

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7567933号
(P7567933)

(45)発行日 令和6年10月16日(2024.10.16)

(24)登録日 令和6年10月7日(2024.10.7)

(51)国際特許分類

F I

H 1 0 N 60/12 (2023.01)

H 1 0 N 60/12

A Z A A

請求項の数 6 (全74頁)

(21)出願番号	特願2022-566737(P2022-566737)	(73)特許権者	000004237
(86)(22)出願日	令和2年12月4日(2020.12.4)		日本電気株式会社
(86)国際出願番号	PCT/JP2020/045247		東京都港区芝五丁目7番1号
(87)国際公開番号	WO2022/118463	(74)代理人	100103894
(87)国際公開日	令和4年6月9日(2022.6.9)		弁理士 家入 健
審査請求日	令和5年5月30日(2023.5.30)	(72)発明者	佐藤 哲朗
(出願人による申告)平成30年度、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発／次世代コンピューティング技術の開発」委託研究、産業技術力強化法第17条の適用を受ける特許出願			東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内
		(72)発明者	山本 剛
			東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内
		審査官	渡邊 佑紀

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 量子デバイス及びその製造方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

超伝導材料で層状に形成された複数の第1の導体と、
少なくとも一部が前記第1の導体に積層され、超伝導材料で形成された複数の第2の導体と、
超伝導材料で形成された導体層と、
超伝導材料で形成された少なくとも1つの接続導体と、
を有し、
前記第1の導体と前記第2の導体との間に酸化膜が形成され、複数の前記第1の導体のうちの1つの前記第1の導体の一部と複数の前記第2の導体のうちの1つの前記第2の導体の一部と前記酸化膜とによってジョセフソン接合が形成され、
前記第1の導体には前記第2の導体に覆われていない少なくとも1つの第1の突出部が形成されており、
前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第1の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第1の側において、前記ジョセフソン接合を構成する前記第1の導体に複数の前記第1の突出部が形成され、複数の前記第1の突出部が、前記接続導体によって前記導体層と接続されており、
前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第2の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第2の側において、前記ジョセフソン接合を構成する前記第2の導体には前記第1の導体よりも突出した複数の第2の突出部が形成

され、複数の前記第2の突出部が、前記接続導体によって前記導体層と接続されている、量子デバイス。

【請求項2】

超伝導材料で層状に形成された複数の第1の導体と、
少なくとも一部が前記第1の導体に積層され、超伝導材料で形成された複数の第2の導体と、

超伝導材料で形成された導体層と、

超伝導材料で形成された少なくとも1つの接続導体と、
を有し、

前記第1の導体と前記第2の導体との間に酸化膜が形成され、複数の前記第1の導体のうちの1つの前記第1の導体の一部と複数の前記第2の導体のうちの1つの前記第2の導体の一部と前記酸化膜とによってジョセフソン接合が形成され、

前記第1の導体には前記第2の導体に覆われていない少なくとも1つの第1の突出部が形成されており、

前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第1の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第1の側において、前記ジョセフソン接合を構成する前記第1の導体に少なくとも1つの前記第1の突出部が形成され、前記接続導体によって当該第1の突出部が前記導体層と接続されており、

前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第2の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第2の側において、前記ジョセフソン接合を構成する前記第2の導体には前記第1の導体よりも突出した少なくとも1つの第2の突出部が形成され、前記接続導体によって前記第2の突出部が前記導体層と接続されており、

前記第1の側において、複数の前記第2の導体のうちの前記ジョセフソン接合を構成する前記第2の導体とは異なり前記ジョセフソン接合を構成しない前記第2の導体は前記導体層と前記接続導体を介して接続されておらず、

前記第2の側において、複数の前記第1の導体のうちの前記ジョセフソン接合を構成する前記第1の導体とは異なり前記ジョセフソン接合を構成しない前記第1の導体は前記導体層と前記接続導体を介して接続されていない、

量子デバイス。

【請求項3】

超伝導材料で層状に形成された複数の第1の導体と、

少なくとも一部が前記第1の導体に積層され、超伝導材料で形成された複数の第2の導体と、

超伝導材料で形成された導体層と、

超伝導材料で形成された少なくとも1つの接続導体と、
を有し、

前記第1の導体と前記第2の導体との間に酸化膜が形成され、複数の前記第1の導体のうちの1つの前記第1の導体の一部と複数の前記第2の導体のうちの1つの前記第2の導体の一部と前記酸化膜とによってジョセフソン接合が形成され、

前記第1の導体には前記第2の導体に覆われていない複数の第1の突出部が形成されており、

複数の前記第1の突出部の近傍において、前記第2の導体には、前記第1の突出部と互いに同じ側に突出した複数の第2の突出部が形成され、前記接続導体によって、第1の突出部及び前記第2の突出部が前記導体層と接続されている、

量子デバイス。

【請求項4】

超伝導材料で形成された導体層が形成された基板に、超伝導材料で形成され複数の第1の突出部を有する第1の導体と超伝導材料で形成された第2の導体とによってジョセフソン接合を形成するためのレジストマスクを形成し、

前記レジストマスクが形成された基板に、第1の方向からの斜め蒸着によって、複数の

10

20

30

40

50

前記第 1 の導体を積層し、前記第 1 の導体を積層する際に、前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第 1 の導体が前記導体層の方に延びるように形成される側である第 1 の側に複数の前記第 1 の突出部を形成し、

前記第 1 の導体の表面を酸化して酸化膜を形成し、

複数の前記第 1 の導体それぞれに、第 2 の方向からの斜め蒸着によって、前記第 2 の導体の少なくとも一部を積層し、前記第 1 の導体の一部と前記第 2 の導体の一部とが重なるように前記第 2 の導体の斜め蒸着を行い、これによって、複数の前記第 1 の導体のうちの 1 つの前記第 1 の導体の一部と複数の前記第 2 の導体のうちの 1 つの前記第 2 の導体の一部と前記酸化膜とによって前記ジョセフソン接合を形成し、前記第 2 の導体を積層する際に、前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第 2 の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第 2 の側に、前記第 2 の導体に前記第 1 の導体よりも突出した複数の第 2 の突出部を形成し、

前記第 2 の導体に覆われていない前記第 1 の突出部と前記導体層とに超伝導材料で形成された接続導体を積層することによって、複数の前記第 1 の突出部と前記導体層とを接続し、

前記接続導体によって、複数の前記第 2 の突出部を前記導体層と接続する、

量子デバイスの製造方法。

【請求項 5】

超伝導材料で形成された導体層が形成された基板に、超伝導材料で形成され第 1 の突出部を有する第 1 の導体と超伝導材料で形成された第 2 の導体とによってジョセフソン接合を形成するためのレジストマスクを形成し、

前記レジストマスクが形成された基板に、第 1 の方向からの斜め蒸着によって、複数の前記第 1 の導体を積層し、前記第 1 の導体を積層する際に、前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第 1 の導体が前記導体層の方に延びるように形成される側である第 1 の側に前記第 1 の突出部を形成し、

前記第 1 の導体の表面を酸化して酸化膜を形成し、

複数の前記第 1 の導体それぞれに、第 2 の方向からの斜め蒸着によって、前記第 2 の導体の少なくとも一部を積層し、前記第 1 の導体の一部と前記第 2 の導体の一部とが重なるように前記第 2 の導体の斜め蒸着を行い、これによって、複数の前記第 1 の導体のうちの 1 つの前記第 1 の導体の一部と複数の前記第 2 の導体のうちの 1 つの前記第 2 の導体の一部と前記酸化膜とによって前記ジョセフソン接合を形成し、前記第 2 の導体を積層する際に、前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第 2 の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第 2 の側に、前記第 2 の導体に前記第 1 の導体よりも突出した第 2 の突出部を形成し、

前記第 1 の側において、前記第 2 の導体に覆われていない前記第 1 の突出部と前記導体層とに超伝導材料で形成された接続導体を積層し、複数の前記第 2 の導体のうちの前記ジョセフソン接合を構成する前記第 2 の導体とは異なり前記ジョセフソン接合を構成しない前記第 2 の導体が前記導体層と超伝導材料で形成された接続導体を介して接続されないように、前記接続導体によって前記第 1 の突出部と前記導体層とを接続し、

前記第 2 の側において、複数の前記第 1 の導体のうちの前記ジョセフソン接合を構成する前記第 1 の導体とは異なり前記ジョセフソン接合を構成しない前記第 1 の導体が前記導体層と直接又は導体を介して接続されないように、前記接続導体によって前記第 2 の突出部と前記導体層とを接続する、

量子デバイスの製造方法。

【請求項 6】

超伝導材料で形成された導体層が形成された基板に、超伝導材料で形成され複数の第 1 の突出部を有する第 1 の導体と超伝導材料で形成された第 2 の導体とによってジョセフソン接合を形成するためのレジストマスクを形成し、

前記レジストマスクが形成された基板に、第 1 の方向からの斜め蒸着によって、複数の前記第 1 の導体を積層し、

前記第 1 の導体の表面を酸化して酸化膜を形成し、

複数の前記第 1 の導体それぞれに、第 2 の方向からの斜め蒸着によって、前記第 2 の導体の少なくとも一部を積層し、これによって、複数の前記第 1 の導体のうちの 1 つの前記第 1 の導体の一部と複数の前記第 2 の導体のうちの 1 つの前記第 2 の導体の一部と前記酸化膜とによって前記ジョセフソン接合を形成し、前記第 2 の導体を積層する際に、複数の前記第 1 の突出部の近傍において、前記第 2 の導体に、前記第 1 の突出部と互いに同じ側に突出した複数の第 2 の突出部を形成し、

前記第 2 の導体に覆われていない前記第 1 の突出部と前記導体層とに超伝導材料で形成された接続導体を積層することによって、複数の前記第 1 の突出部と前記導体層とを接続し、前記第 1 の導体に形成された前記第 1 の突出部の近傍で、複数の前記第 2 の突出部と前記導体層とを前記接続導体によって接続する、

量子デバイスの製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、量子デバイス及びその製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

特許文献 1 は、量子コンピュータのキュービットを実現する方法を開示する。ベースアルミニウムワイヤリング層、ベースアルミニウムワイヤリング層の表面の上に形成されている第 1 のアルミニウム層、および、第 1 のアルミニウム層の表面の上に形成されている第 2 のアルミニウム層が、キュービットを形成するために使用される。また、第 2 のアルミニウム層に接触している第 1 のアルミニウム層の表面を酸化させることによって、第 1 のアルミニウム層と第 2 のアルミニウム層との間に、ジョセフソン接合におけるトンネルバリアが形成されている。特許文献 1 にかかるキュービットでは、ジョセフソン接合が、第 1 のアルミニウム層と、第 2 のアルミニウム層と、トンネルバリアとによって形成されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【文献】特表 2019-532506 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

特許文献 1 は、ベースアルミニウムワイヤリング層と第 1 のアルミニウム層との接続、および、ベースアルミニウムワイヤリング層と第 2 のアルミニウム層との接続について、開示していない。したがって、特許文献 1 にかかる技術では、キュービット（量子デバイス）の性能が劣化するおそれがある。

【0005】

本開示の目的の 1 つは、このような課題を解決するためになされたものであり、性能の劣化を抑制することが可能な量子デバイス及びその製造方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本開示にかかる量子デバイスは、超伝導材料で層状に形成された複数の第 1 の導体と、少なくとも一部が前記第 1 の導体に積層され、超伝導材料で形成された複数の第 2 の導体と、超伝導材料で形成された導体層と、を有し、前記第 1 の導体と前記第 2 の導体との間に酸化膜が形成され、複数の前記第 1 の導体のうちの 1 つの前記第 1 の導体の一部と複数の前記第 2 の導体のうちの 1 つの前記第 2 の導体の一部と前記酸化膜とによってジョセフソン接合が形成され、前記第 1 の導体には前記第 2 の導体に覆われていない少なくとも 1 つの第 1 の突出部が形成されており、前記第 1 の突出部と前記導体層とが、直接又は導体

10

20

30

40

50

を介して接続されており、前記第2の導体と前記導体層とが、直接又は導体を介して接続されている。

【0007】

また、本開示にかかる量子デバイスの製造方法は、超伝導材料で形成された導体層が形成された基板に、超伝導材料で形成され第1の突出部を有する第1の導体と超伝導材料で形成された第2の導体とによってジョセフソン接合を形成するためのレジストマスクを形成し、前記レジストマスクが形成された基板に、第1の方向からの斜め蒸着によって、複数の前記第1の導体を積層し、前記第1の導体の表面を酸化して酸化膜を形成し、複数の前記第1の導体それぞれに、第2の方向からの斜め蒸着によって、前記第2の導体の少なくとも一部を積層し、これによって、複数の前記第1の導体のうちの1つの前記第1の導体の一部と複数の前記第2の導体のうちの1つの前記第2の導体の一部と前記酸化膜とによって前記ジョセフソン接合を形成し、前記第2の導体に覆われていない前記第1の突出部と前記導体層とを、直接又は導体を介して接続し、前記第2の導体と前記導体層とを、直接又は導体を介して接続する。

【発明の効果】

【0008】

本開示によれば、性能の劣化を抑制することが可能な量子デバイス及びその製造方法を提供できる。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】本実施の形態にかかる量子デバイスの概要を示す図である。

【図2】第1の比較例にかかる量子デバイスを示す図である。

【図3】第1の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

【図4】第1の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

【図5】第1の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

【図6】第1の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

【図7】第1の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

【図8】第1の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

【図9】第1の比較例にかかる量子デバイスの回路構成を模式的に示す図である。

【図10】第2の比較例にかかる量子デバイスを示す図である。

【図11】第2の比較例にかかる量子デバイスの回路構成を模式的に示す図である。

【図12】第3の比較例にかかる量子デバイスを示す図である。

【図13】第3の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を説明するための図である。

【図14】第3の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を説明するための図である。

【図15】第3の比較例にかかる量子デバイスの製造方法を説明するための図である。

【図16】実施の形態1にかかる量子デバイスを示す図である。

【図17】実施の形態1にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

【図18】実施の形態1にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

【図19】実施の形態1にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

【図20】実施の形態1にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

【図21】実施の形態1にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

【図22】実施の形態1にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

【図23】実施の形態1にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

【図24】実施の形態1にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。

【図25】実施の形態2にかかる量子デバイスを示す図である。

【図26】実施の形態2にかかる量子デバイスの実現例を示す図である。

【図27】図26に示した量子デバイスの製造方法を説明するための図である。

【図28】実施の形態3にかかる量子デバイスを示す図である。

【図29】実施の形態3にかかる量子デバイスの実現例を示す図である。

【図30】実施の形態4にかかる量子デバイスを示す図である。

10

20

30

40

50

- 【図 3 1】実施の形態 4 にかかる量子デバイスの製造方法を説明するための図である。
- 【図 3 2】実施の形態 5 にかかる量子デバイスを示す図である。
- 【図 3 3】実施の形態 5 にかかる量子デバイスの製造方法を説明するための図である。
- 【図 3 4】実施の形態 6 にかかる量子デバイスを示す図である。
- 【図 3 5】実施の形態 6 にかかる量子デバイスの製造方法を説明するための図である。
- 【図 3 6】実施の形態 7 にかかる量子デバイスを示す図である。
- 【図 3 7】実施の形態 7 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 3 8】実施の形態 7 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 3 9】実施の形態 7 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 4 0】実施の形態 7 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 4 1】実施の形態 7 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 4 2】実施の形態 7 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 4 3】実施の形態 7 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 4 4】実施の形態 7 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 4 5】実施の形態 7 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 4 6】実施の形態 7 にかかる量子デバイスの回路構成を模式的に示す図である。
- 【図 4 7】実施の形態 7 にかかる量子デバイスの変形例を示す図である。
- 【図 4 8】実施の形態 7 にかかる酸化膜除去工程の変形例を説明するための図である。
- 【図 4 9】実施の形態 8 にかかる量子デバイスを示す図である。
- 【図 5 0】実施の形態 9 にかかる量子デバイスを示す図である。
- 【図 5 1】実施の形態 9 にかかる量子デバイスの回路構成を模式的に示す図である。
- 【図 5 2】実施の形態 9 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 5 3】実施の形態 9 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 5 4】実施の形態 9 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 5 5】実施の形態 9 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 5 6】実施の形態 9 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 5 7】実施の形態 9 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 5 8】実施の形態 9 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 5 9】実施の形態 9 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 6 0】実施の形態 9 にかかる量子デバイスの製造方法を示す工程図である。
- 【図 6 1】実施の形態 10 にかかる量子デバイスを示す図である。

10

20

30

【発明を実施するための形態】

【0010】

(本開示にかかる実施の形態の概要)

本開示の実施形態の説明に先立って、本開示にかかる実施の形態の概要について説明する。図 1 は、本実施の形態にかかる量子デバイス 1 の概要を示す図である。

【0011】

量子デバイス 1 は、複数の第 1 の導体 2 と、複数の第 2 の導体 4 と、導体層 6 (第 3 の導体) とを有する。第 2 の導体 4 は、第 1 の導体 2 に積層されている。第 1 の導体 2、第 2 の導体 4 及び導体層 6 は、超伝導材料で形成されている。例えば、第 1 の導体 2 及び第 2 の導体 4 は、アルミニウム (Al) で形成されていてもよいが、これに限定されない。また、例えば、導体層 6 は、ニオブ (Nb) で形成されていてもよいが、これに限定されない。また、導体層 6 は、例えば、量子デバイス 1 の回路を構成する。導体層 6 は、例えば、配線、共振器、キャパシタ及びグランドプレーン等の超伝導回路を構成していてもよい。

40

【0012】

また、第 1 の導体 2 と第 2 の導体 4 との間には、酸化膜 8 が形成されている。酸化膜 8 は、例えば、第 1 の導体 2 に第 2 の導体 4 を積層する前に、第 1 の導体 2 の表面に酸化処理を施すことによって、形成され得る。また、複数の第 1 の導体 2 のうちの 1 つの第 1 の導体 2 の一部と、複数の第 2 の導体 4 のうちの 1 つの第 2 の導体 4 の一部と、酸化膜 8 と

50

によって、ジョセフソン接合 10 が形成されている。

【0013】

ここで、矢印 X1 で示すように、ジョセフソン接合 10 を構成する第 1 の導体 2 が、導体層 6 と、直接又は他の導体を介して接続されている。例えば、第 1 の導体 2 と導体層 6 とが、導体ではない酸化膜（誘電体）を介さないで接続されていてもよい。同様に、矢印 X2 で示すように、ジョセフソン接合 10 を構成する第 2 の導体 4 が、導体層 6 と、直接又は他の導体を介して接続されている。例えば、第 2 の導体 4 と導体層 6 とが、導体ではない酸化膜（誘電体）を介さないで接続されていてもよい。なお、例えば、第 1 の導体 2 と導体層 6 とは、第 1 の導体 2 と第 2 の導体 4 との間に形成された酸化膜 8 だけでなく、他の酸化膜も介さないで、（電氣的に）接続されていてもよい。同様に、例えば、第 2 の導体 4 と導体層 6 とは、第 1 の導体 2 と第 2 の導体 4 との間に形成された酸化膜 8 だけでなく、他の酸化膜も介さないで、（電氣的に）接続されていてもよい。なお、「（第 1 の導体 2 と導体層 6 とが）酸化膜（誘電体）を介さないで接続されている」とは、第 1 の導体 2 と導体層 6 との間に全く酸化膜が存在しないことのみを意味するわけではない。「酸化膜（誘電体）を介さないで接続されている」とは、第 1 の導体 2 と導体層 6 との間の接続ルートに、一部分でも、酸化膜（誘電体）を介さないで、直接又は他の導体を介して接続されている箇所があるという意味である。つまり、本実施の形態では、第 1 の導体 2 と導体層 6 との間の接続ルートに、直接又は他の導体を介して接続されている箇所があれば、その他の一部については、酸化膜（誘電体）を介して接続されていてもよい。また、「（第 1 の導体 2 と導体層 6 とが）直接、接続されている」とは、第 1 の導体 2 と導体層 6 との接続面に、一部分でも、酸化膜（誘電体）を介さないで接している箇所があるという意味である。これらのことは、後述する実施の形態においても同様である。

【0014】

なお、ジョセフソン接合 10 を構成する第 1 の導体 2 には、第 2 の導体 4 に覆われていない少なくとも 1 つの突出部 2a（第 1 の突出部）が形成されていてもよい。そして、突出部 2a と導体層 6 とが、直接又は他の導体を介して接続されていてもよい。例えば、突出部 2a と導体層 6 とが、酸化膜 8 を介さないで接続されていてもよい。

【0015】

本実施の形態にかかる量子デバイス 1 は、上記のように構成されていることによって、性能の劣化を抑制することが可能となる。つまり、本実施の形態にかかる量子デバイス 1 は、デコヒーレンスを抑制することが可能である。詳しくは、以下に示す比較例とともに後述する。

【0016】

（比較例）

<第 1 の比較例>

図 2 は、第 1 の比較例にかかる量子デバイス 90 を示す図である。図 2 は、第 1 の比較例にかかる量子デバイス 90 の断面図である。第 1 の比較例にかかる量子デバイス 90 は、基板 60 と、複数の第 1 の導体 110（110A, 110B）と、複数の第 2 の導体 120（120A, 120B）と、超伝導回路を構成する導体層 130（130A, 130B）とを有する。第 1 の導体 110、第 2 の導体 120 及び導体層 130 は、基板 60 に積層されている。

【0017】

第 1 の導体 110 は、導体層 130 に積層されている。第 2 の導体 120 は、第 1 の導体 110 に積層されている。第 1 の導体 110、第 2 の導体 120 及び導体層 130 は、超伝導材料で形成されている。以下の説明では、第 1 の導体 110 及び第 2 の導体 120 は、アルミニウム（Al）で形成されているとする。また、以下の説明では、導体層 130（第 3 の導体）は、ニオブ（Nb）で形成されているとする。

【0018】

また、第 1 の導体 110 と第 2 の導体 120 との間には、酸化膜 140（140A, 140B）が形成されている。酸化膜 140 は、例えば、第 1 の導体 110 に第 2 の導体 1

10

20

30

40

50

20を積層する前に、第1の導体110の表面に酸化処理を施すことによって、形成される。また、第1の導体110(110A)の一部(第1の導体部分110Aa)と、第2の導体120(120B)の一部(第2の導体部分120Ba)と、酸化膜140(140A)とによって、ジョセフソン接合100が形成されている。

【0019】

ここで、ジョセフソン接合100に対して、ジョセフソン接合100を構成する第1の導体110Aが導体層130Aの方に延びるように形成された側(図2の右側)を、第1の側70Aとする。つまり、第1の側70Aは、図2においてジョセフソン接合100よりも右側に対応する。また、ジョセフソン接合100に対して、ジョセフソン接合100を構成する第2の導体120Bが導体層130Bの方に延びるように形成された側(図2の左側)を、第2の側70Bとする。つまり、第2の側70Bは、図2においてジョセフソン接合100よりも左側に対応する。なお、後述するように、基板60の側から見て垂直方向から第1の側70Aの側に傾いた方向である第1の方向(矢印A1で示す)から斜め蒸着を行うことによって、2つの第1の導体110が蒸着される。また、基板60の側から見て垂直方向から第2の側70Bの側に傾いた方向である第2の方向(矢印A2で示す)から斜め蒸着を行うことによって、2つの第2の導体120が蒸着される。ここで、「垂直方向」とは、基板60の、ジョセフソン接合100が形成された表面、つまり、第1の導体110、第2の導体120及び導体層130が積層された表面に対して垂直な方向のことである。このことは、後述する説明においても同様である。

【0020】

第1の側70Aにおいて、基板60及び導体層130Aに、第1の導体110Aが積層されている。また、第1の導体110A及び導体層130Aに、第2の導体120Aが積層されている。また、導体層130Aの、基板60及び第1の導体110Aと接していない面には、酸化膜132A(NbO_x:ニオブ酸化物)が形成されている。また、第1の導体110Aの、基板60及び導体層130Aと接していない面には、酸化膜140A(AlO_x:アルミニウム酸化物)が形成されている。つまり、第1の導体110Aの、第2の導体120A及び第2の導体120Bと接している面には、酸化膜140Aが形成されている。

【0021】

一方、第2の側70Bにおいて、基板60及び導体層130Bに、第1の導体110Bが積層されている。また、基板60及び第1の導体110Bに、第2の導体120Bが積層されている。ここで、第1の導体110Aの、第2の側70Bの端部である第1の導体部分110Aaに、酸化膜140Aを介して、第2の導体120Bの、第1の側70Aの端部である第2の導体部分120Baが積層されている。第1の導体部分110Aaに酸化膜140A(トンネルバリア層102)を介して第2の導体部分120Baが積層されていることにより、ジョセフソン接合100が形成されている。また、導体層130Bの、基板60及び第1の導体110Bと接していない面には、酸化膜132B(NbO_x)が形成されている。また、第1の導体110Bの、基板60及び導体層130Bと接していない面には、酸化膜140B(AlO_x)が形成されている。つまり、第1の導体110Bの、第2の導体120Bと接している面には、酸化膜140Bが形成されている。

【0022】

ここで、第1の比較例にかかるジョセフソン接合100の生成方法の概要について説明する。ジョセフソン接合100は、斜め蒸着法を用いて生成する。この方法では、基板60上に、予め、第1の導体110及び第2の導体120の形状に対応するレジストマスクを設けておく。そして、基板60に対する蒸着方向を変えて、2回、超伝導材料の薄膜(第1の導体110及び第2の導体120)を蒸着する。つまり、1回目の蒸着処理で第1の導体110が蒸着され、2回目の蒸着処理で第2の導体120が蒸着される。1回目の蒸着処理の後で第1の導体110の表面を酸化させる。これによって形成された酸化膜140は、ジョセフソン接合100のトンネルバリア層102として機能する。また、後述するように、2回の蒸着処理で互いに同じレジストマスクを、基板60に対して移動させ

ないで使用するため、同じ形状の超伝導体（第１の導体１１０及び第２の導体１２０）が少しずれた形で重なり合うこととなる。この重なり部分に、意図的に形成されるジョセフソン接合１００と、意図せず形成されるスプリアス接合８０（寄生接合）とが形成される。スプリアス接合８０（spurious junction）については後述する。

【００２３】

図３～図８は、第１の比較例にかかる量子デバイス９０の製造方法を示す工程図である。図３～図８において、上図は平面図であり、下図は平面図のＩ－Ｉ線断面図である。また、平面図において、基板６０は省略されている。これらのことは、後述する工程図においても同様である。また、平面図において、説明のため、第１の導体１１０と第２の導体１２０とが重なっている箇所については、第２の導体１２０の下にある第１の導体１１０が可視化されるようにしている。このことは、他の平面図においても同様である。

10

【００２４】

まず、図３に示すように、基板６０を用意し、基板６０に導体層１３０を成膜する（導体層成膜工程）。導体層１３０の成膜は、例えば、スパッタリングによって行われ得る。あるいは、導体層１３０の成膜は、蒸着又はＣＶＤ（Chemical Vapor Deposition）によって行われてもよい。そして、導体層１３０への回路パターンの形成は、例えば、光学のリソグラフィおよび反応性イオンエッチングの組み合わせによって行われ得る。なお、光学のリソグラフィに代えて電子線描画法等を用いてもよい。また、反応性イオンエッチングに代えてウェットエッチング等を用いてもよい。なお、導体層１３０の表面（基板６０に接していない面）には、酸化膜１３２（ニオブ酸化物層）が形成されている。

20

【００２５】

次に、図４に示すように、レジストマスク２０（レジストパターン）が形成される（レジストマスク形成工程）。このとき、基板６０等は真空環境下に置かれる。つまり、基板６０等は、内部が真空状態となった容器内に密閉されて配置されている。また、レジストマスク２０が除去されるまで、レジストマスク２０は、基板６０に対して移動されず、固定されている。レジストマスク２０のレジストパターンによって、開口部２１（２１Ａ，２１Ｂ）が形成される。開口部２１は、平面図に太い破線で示されている。この太い破線で囲まれた領域が、開口部２１に対応する（他の開口部が示された平面図においても同様）。なお、以後、レジストマスク２０を除去するまで、開口部２１と対向する箇所以外の基板６０及び導体層１３０は、レジストマスク２０で覆われている。また、レジストマスク２０は、レジストブリッジ２０ｂを有する。これによって、開口部２１が２つの開口部２１Ａ，２１Ｂに分離されている。

30

【００２６】

この状態で、導体層１３０の表面の酸化膜１３２を除去する（酸化膜除去工程）。酸化膜１３２の除去は、例えば、矢印Ｂで示すように開口部２１を介してイオンビームを照射する、イオンミリング等によって行われる。イオンミリングは、例えばアルゴンイオンビームを照射することによって行われる。なお、導体層１３０の表面の酸化膜１３２を除去するのは、導体層１３０と超伝導体（第１の導体１１０及び第２の導体１２０）との接続（超伝導コンタクト）を形成するためである。なお、酸化膜除去工程では、開口部２１に対応する面に形成された酸化膜１３２を全て除去する必要はない。導体層１３０と超伝導体との接続が確保されれば、酸化膜除去工程において、開口部２１に対応する面に形成された酸化膜１３２の一部が、除去されずに残存してもよい。このことは、他の酸化膜除去工程においても同様である。

40

【００２７】

次に、図５に示すように、矢印Ａ１に示す方向からの斜め蒸着により、第１の導体１１０が蒸着される（第１の蒸着処理工程）。斜め蒸着の方向は、基板６０の側から見て、基板６０の表面に対する垂直方向に対して第１の側７０Ａの方に例えば２０度程度傾いた方向である。つまり、垂直方向に対する角度を $\theta 1$ とすると、 $\theta 1 = 20$ 度程度の方向から、超伝導材料を蒸着する。図５に示すように、第１の蒸着処理工程では、基板６０の側から見て、基板６０の表面に対する垂直方向から第１の側７０Ａの方に角度 $\theta 1$ 傾いた方向

50

から、超伝導材料が射出される。なお、斜め蒸着の方向の調整は、基板 60 を傾けることによって行われてもよいし、超伝導材料を射出するノズルの向きを変えることによって行われてもよい。

【0028】

このようにして、開口部 21A を介して、第 1 の導体 110A が蒸着される。また、開口部 21B を介して、第 1 の導体 110B が蒸着される。また、レジストマスク 20 には、第 1 の導体 110 とともに蒸着された超伝導材料 110X (Al) が積層される。ここで、レジストブリッジ 20b によって遮蔽されることで、第 1 の導体 110 が基板 60 上に成膜されない箇所がある。つまり、レジストブリッジ 20b によって、第 1 の導体 110A と第 1 の導体 110B とを分離する隙間 G1 が形成される。

10

【0029】

次に、図 6 に示すように、第 1 の導体 110 の表面を酸化する（酸化工程）。具体的には、基板 60 等が配置された容器に酸素ガスを封入することで、第 1 の導体 110 の表面が酸化される。これにより、第 1 の導体 110A の表面に酸化膜 140A (AlOx) が形成される。また、第 1 の導体 110B の表面に酸化膜 140B (AlOx) が形成される。さらに、導体層 130 の第 1 の導体 110A 及びレジストマスク 20 に覆われていない箇所に、酸化膜 132A (NbOx) が形成される。

【0030】

次に、図 7 に示すように、矢印 A2 に示す方向からの斜め蒸着により、第 2 の導体 120 が蒸着される（第 2 の蒸着処理工程）。第 2 の蒸着処理工程では、基板 60 の側から見、基板 60 の表面に対する垂直方向から第 2 の側 70B の方に角度 $\theta 1$ 傾いた方向から、超伝導材料を射出する。このとき、開口部 21A を介して、第 2 の導体 120A が蒸着される。また、開口部 21B を介して、第 2 の導体 120B が蒸着される。また、レジストマスク 20 には、第 2 の導体 120 とともに蒸着された超伝導材料 120X (Al) が積層される。ここで、レジストブリッジ 20b によって遮蔽されることで、第 2 の導体 120 が第 1 の導体 110 上に成膜されない箇所がある。つまり、レジストブリッジ 20b によって、第 1 の導体 110A 上に、第 2 の導体 120A と第 2 の導体 120B とを分離する隙間 G2 が形成される。また、第 1 の導体 110A と第 2 の導体 120B とが重なる箇所に、ジョセフソン接合 100 が形成される。また、隙間 G1 と隙間 G2 とによって、ジョセフソン接合 100 の面積が小さくなる。逆に言うと、ジョセフソン接合 100 の面積が適切となるように、斜め蒸着の方向（基板 60 の表面に対する垂直方向に対する角度）が決定され得る。ジョセフソン接合 100 の面積については後述する。

20

30

【0031】

次に、図 8 に示すように、レジストマスク 20 が除去される（リフトオフ工程）。これにより、レジストマスク 20 と、レジストマスク 20 に積層された余分な超伝導材料 110X, 120X が除去される。このようにして、図 2 に示した、第 1 の比較例にかかる量子デバイス 90 が製造される。なお、図 4～図 7 の工程は、同一の密閉状態で実行される。「同一の密閉状態」とは、一貫して、基板 60 等が容器に密閉され、大気圧よりも低い気圧である密閉状態の環境から大気環境に開放されないことを意味する。なお、同一の密閉状態では、酸化膜除去工程（図 4）ではアルゴン等が容器に封入され、酸化工程（図 6）では酸素が容器に封入されるが、それ以外の工程では、容器内は真空環境下にある状態である。「同一の密閉状態」については、後述する比較例及び実施の形態においても同様である。

40

【0032】

ここで、図 2 を用いて、上述したスプリアス接合 80 について説明する。上述したように、第 1 の導体 110A の第 1 の導体部分 110Aa と、第 2 の導体 120B の第 2 の導体部分 120Ba と、両者の間の酸化膜 140A とによって、ジョセフソン接合 100 が形成される。一方、ジョセフソン接合 100 以外にも、第 1 の導体 110 と第 2 の導体 120 との間に酸化膜 140 が形成されている箇所がある。この箇所に、スプリアス接合 80 が形成されてしまう。具体的には、第 1 の導体 110A と第 2 の導体 120A と酸化膜

50

140Aとによって、スプリアス接合80Aが形成される。また、第1の導体110Bと第2の導体120Bと酸化膜140Bとによって、スプリアス接合80Bが形成される。なお、スプリアス接合80の面積は、ジョセフソン接合100の面積よりも大きくなるように構成されている。スプリアス接合80の面積がジョセフソン接合100の面積よりも小さいと、スプリアス接合80がジョセフソン接合100として振る舞ってしまうからである。

【0033】

ここで、スプリアス接合80は、以下に説明するように、量子デバイスの性能（コヒーレンス）の劣化の原因となり得る。すなわち、量子デバイス（超伝導量子ビット）のコヒーレンスを劣化させるデコヒーレンス要因の1つに二準位欠陥（T L S : Two-Level System）がある。二準位欠陥は、アモルファス等の材料中に自然に形成された一種の量子ビットであり、意図的に生成された量子ビットと結合して、この量子ビットのコヒーレンスを劣化させるなど、動作に悪影響を与え得る。二準位欠陥は、素子中の酸化層やアモルファス層といった誘電体の中に広く存在している。つまり、酸化膜140及び酸化膜132の中にも、二準位欠陥が存在する。

【0034】

ここで、スプリアス接合80は、ジョセフソン接合100と同じプロセス（図5～図7）で形成される。したがって、スプリアス接合80の酸化膜140の中には、ジョセフソン接合100のトンネルバリア層102（酸化膜140A）の中と同じ密度で二準位欠陥が含まれている。ここで、上述したようにジョセフソン接合100の面積は小さいため、トンネルバリア層102に二準位欠陥が存在する確率は低い。言い換えると、二準位欠陥の存在確率を低下させるために、ジョセフソン接合100の面積がなるべく小さくなるように、量子デバイスが設計される。

【0035】

一方、上述したようにスプリアス接合80の面積はジョセフソン接合100の面積よりも大きいため、スプリアス接合80の酸化膜140に二準位欠陥が存在する確率は高い。このように、斜め蒸着法で製造される量子デバイスにおけるスプリアス接合80の存在は、主要なデコヒーレンスの要因となり得る。具体的には、酸化膜140によって構成されるスプリアス接合80は、第1の導体110と第2の導体120との間のキャパシタとして振る舞う。そして、このキャパシタを横切る電界が大きくなると、酸化膜140の中の二準位欠陥の電気双極子と量子ビットとが結合することで、デコヒーレンス（ロス）が引き起こされる。したがって、このスプリアス接合80がデコヒーレンスの要因とならないようにすることが望まれる。

【0036】

図9は、第1の比較例にかかる量子デバイス90の回路構成を模式的に示す図である。第2の側70Bでは、ジョセフソン接合100から導体層130Bとの間の電氣的な経路は、キャパシタとして機能するスプリアス接合80Bを経由するものしか存在しない。すなわち、ジョセフソン接合100と第2の導体120Bとが接続され、酸化膜140Bに対応するスプリアス接合80Bを介して第2の導体120Bと第1の導体110Bとが接続され、第1の導体110Bが導体層130Bに接続されている。したがって、スプリアス接合80Bに発生する電界が大きくなるので、スプリアス接合80Bはロスの発生に寄与することとなる。

【0037】

一方、第1の側70Aでは、ジョセフソン接合100から導体層130Aとの間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合80Aを経由する第1の経路以外にも、第2の経路が存在する。すなわち、第1の経路は、ジョセフソン接合100が、第1の導体110Aとスプリアス接合80A（酸化膜140A）と第2の導体120Aと酸化膜132Aとを介して、導体層130Aと接続される経路である。なお、酸化膜132Aは、酸化工程（図6）によって形成されたものである。一方、第2の経路は、ジョセフソン接合100が第1の導体110Aと接続され、第1の導体110Aと導体層13

0 Aとが直接接続される経路である。つまり、スプリアス接合80 Aの両端の導体（第1の導体110 A及び導体層130 A）が短絡しており、スプリアス接合80 Aは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合80 Aに発生する電界は大きくなりないので、スプリアス接合80 Aはロスの発生に寄与しないこととなる。

【0038】

ここで、第2の側70 Bでも、スプリアス接合80 Bを無効化することが望まれる。そこで、以下に説明するように、第2の導体120 Bと導体層130 Bとを短絡する方法を考える。そこで、以下に説明する第2の比較例では、接続導体によって、第2の導体120 Bと導体層130 Bとを短絡する方法を考える。

【0039】

<第2の比較例>

図10は、第2の比較例にかかる量子デバイス90を示す図である。図10は、第2の比較例にかかる量子デバイス90の断面図である。第2の比較例にかかる量子デバイス90は、第1の比較例と同様に、基板60と、複数の第1の導体110（110 A，110 B）と、複数の第2の導体120（120 A，120 B）と、超伝導回路を構成する導体層130（130 A，130 B）とを有する。第1の導体110、第2の導体120及び導体層130は、基板60に積層されている。第1の導体110、第2の導体120及び導体層130の構成については、特記しない限り、第1の比較例と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

【0040】

また、第2の比較例にかかる量子デバイス90は、さらに、接続導体150（150 A，150 B）を有する。接続導体150は、超伝導材料で形成されている。以下の説明では、接続導体150は、アルミニウム（Al）で形成されているとする。

【0041】

また、第1の導体110と第2の導体120との間には、酸化膜140（140 A，140 B）が形成されている。また、第1の導体110（110 A）の一部（第1の導体部分110 A a）と、第2の導体120（120 B）の一部（第2の導体部分120 B a）と、酸化膜140（140 A）とによって、ジョセフソン接合100が形成されている。ジョセフソン接合100の構成については、第1の比較例のものと実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

【0042】

また、第1の側70 Aにおいて、基板60及び導体層130 Aに、第1の導体110 Aが積層されている。また、第1の導体110 A及び導体層130 Aに、第2の導体120 Aが積層されている。また、導体層130 A及び第2の導体120 Aに、接続導体150 Aが積層されている。また、導体層130 Aの、第1の導体110 A及び第2の導体120 Aと接している面及び露出している面には、酸化膜132 A（NbO_x）が形成されている。なお、導体層130 Aの、接続導体150 Aと接している面には、酸化膜132 Aは形成されていない。また、第1の導体110 Aの、基板60及び導体層130 Aと接していない面（第2の導体120 A及び第2の導体120 Bと接している面）には、酸化膜140 A（AlO_x）が形成されている。

【0043】

一方、第2の側70 Bにおいて、基板60及び導体層130 Bに、第1の導体110 Bが積層されている。また、基板60及び第1の導体110 Bに、第2の導体120 Bが積層されている。また、導体層130 B、第1の導体110 B及び第2の導体120 Bに、接続導体150 Bが積層されている。また、導体層130 Bの、第1の導体110 Bと接している面及び露出している面には、酸化膜132 B（NbO_x）が形成されている。また、第1の導体110 Bの、第2の導体120 Bと接している面には、酸化膜140 B（AlO_x）が形成されている。なお、導体層130 Bの、接続導体150 Bと接している面には、酸化膜132 Bは形成されていない。同様に、第1の導体110 Bの、接続導体150 Bと接している面には、酸化膜140 Bは形成されていない。

【0044】

ここで、第1の比較例では、図4で示したように、第1の導体110の蒸着処理の前に、導体層130の表面の酸化膜132を除去する酸化膜除去工程（イオンミリング）が実行される。これに対し、第2の比較例では、第1の導体110の蒸着処理の前に導体層130に対して酸化膜除去工程が実行されない。酸化膜除去工程を実行しない理由は、第1の導体110の蒸着処理の前に酸化膜除去工程が実行されると、基板60の表面にダメージ層が形成されてしまうおそれがあるからである。このダメージ層が、コヒーレンスを劣化させるロスを発生させる要因となる可能性がある。したがって、第2の比較例では、接続導体150を形成することで、第1の導体110の蒸着処理の前に酸化膜除去工程を実行しなくても、導体層130と超伝導体（第1の導体110及び第2の導体120）との接続（超伝導コンタクト）を形成する。

10

【0045】

第2の比較例にかかる量子デバイス90の製造方法について、第1の比較例の場合と対比して説明する。まず、図3に示した導体層成膜工程が実行され、図4に示したレジストマスク形成工程が実行される。ここで、上述したように、この時点では、酸化膜除去工程は実行されない。そして、図5～図7に示した第1の蒸着処理工程、酸化工程及び第2の蒸着処理工程がそれぞれ実行される。そして、接続導体150用のレジストマスクが形成された状態で酸化膜除去工程が実行され、その後、接続導体150が蒸着される。なお、この酸化膜除去工程では、接続導体150が成膜される箇所の酸化膜が除去される。一方、基板60は接続導体150用のレジストマスクで覆われているので、基板60の表面にダメージ層が形成されない。

20

【0046】

図11は、第2の比較例にかかる量子デバイス90の回路構成を模式的に示す図である。第2の側70Bでは、ジョセフソン接合100から導体層130Bとの間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合80Bを経由する第1の経路以外にも、第2の経路が存在する。すなわち、第1の経路は、ジョセフソン接合100が、第2の導体120Bとスプリアス接合80B（酸化膜140B）と第1の導体110Bと酸化膜132Bとを介して、導体層130Bと接続される経路である。なお、酸化膜132Bは、酸化工程によって形成されたものである。一方、第2の経路は、ジョセフソン接合100が第2の導体120Bと接続され、第2の導体120Bと導体層130Bとが接続導体150Bを介して接続される経路である。つまり、スプリアス接合80Bの両端の導体（第2の導体120B及び導体層130B）が接続導体150Bによって短絡しており、スプリアス接合80Bは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合80Bに発生する電界は大きくなるので、スプリアス接合80Bはロスの発生に寄与しないこととなる。

30

【0047】

一方、第1の側70Aでは、ジョセフソン接合100から導体層130Aとの間の電氣的な経路は、キャパシタとして機能する、スプリアス接合80A又は酸化膜132Aを経由するものしか存在しない。すなわち、ジョセフソン接合100が第1の導体110Aと接続され、第1の導体110Aが、スプリアス接合80A（酸化膜140A）、第2の導体120A及び接続導体150Aを介して、導体層130Aと接続されている。あるいは、第1の導体110Aが、酸化膜132Aを介して、導体層130Aと接続されている。したがって、スプリアス接合80の両端の導体は短絡されず、スプリアス接合80Aに発生する電界が大きくなるので、スプリアス接合80Aはロスの発生に寄与することとなる。

40

【0048】

したがって、第2の比較例では、デコヒーレンスを抑制することが困難である。これに対し、上述したように、本実施の形態にかかる量子デバイス1では、ジョセフソン接合10を構成する第1の導体2と導体層6とが、超伝導コンタクトを形成している。同様に、ジョセフソン接合10を構成する第2の導体4と導体層6とが、超伝導コンタクトを形成している。これにより、本実施の形態にかかる量子デバイス1は、性能の劣化を抑制する

50

ことが可能となる。つまり、本実施の形態にかかる量子デバイス１は、デコヒーレンスを抑制することが可能である。

【００４９】

＜第３の比較例＞

図１２は、第３の比較例にかかる量子デバイス９２を示す図である。図１２は、第３の比較例にかかる量子デバイス９２の平面図である。第３の比較例にかかる量子デバイス９２は、第１の比較例にかかる量子デバイス９０に対応する構成を、別の製造方法によって製造したものである。

【００５０】

第１の比較例及び第２の比較例では、図４等のように、レジストブリッジ２０ｂを有するレジストマスク２０を用いて、量子デバイス９０が製造される。つまり、第１の比較例及び第２の比較例では、レジストブリッジ２０ｂによって、ジョセフソン接合１００が形成される。したがって、第１の比較例及び第２の比較例の製造方法を、「ブリッジ型」と称する。これに対し、第３の比較例では、後述するように、レジストブリッジを有さないレジストマスクを用いて、ジョセフソン接合を形成する。したがって、第３の比較例の製造方法を、「ブリッジレス型」と称する。なお、第３の比較例においても、１つのレジストマスクによって、ジョセフソン接合が形成されることに、留意されたい。

【００５１】

第３の比較例にかかる量子デバイス９２は、第１の導体２１０（２１０Ａ，２１０Ｂ）と、第２の導体２２０（２２０Ａ，２２０Ｂ）と、超伝導回路を構成する導体層２３０（２３０Ａ，２３０Ｂ）とを有する。第１の導体２１０、第２の導体２２０及び導体層２３０は、基板６０に積層されている。

【００５２】

第１の導体２１０は、導体層２３０に積層されている。第２の導体２２０は、第１の導体２１０に積層されている。第１の導体２１０、第２の導体２２０及び導体層２３０は、超伝導材料で形成されている。以下の説明では、第１の導体２１０及び第２の導体２２０は、アルミニウム（Ａｌ）で形成されているとする。また、以下の説明では、導体層２３０（第３の導体）は、ニオブ（Ｎｂ）で形成されているとする。

【００５３】

また、第１の比較例と同様に、第１の導体２１０と第２の導体２２０との間には、酸化膜（ＡｌＯ_x）が形成されている。酸化膜は、例えば、第１の導体２１０に第２の導体２２０を積層する前に、第１の導体２１０の表面に酸化処理を施すことによって、形成され得る。また、第１の比較例と同様に、第１の導体２１０（２１０Ａ）の一部（第１の導体部分２１０Ａ_a）と、第２の導体２２０（２２０Ｂ）の一部（第２の導体部分２２０Ｂ_a）と、酸化膜とによって、ジョセフソン接合２００が形成されている。つまり、第１の導体部分２１０Ａ_aと、第１の導体部分２１０Ａ_aに積層された第２の導体部分２２０Ｂ_aと、第１の導体部分２１０Ａ_aと第２の導体部分２２０Ｂ_aとの間の酸化膜とによって、ジョセフソン接合２００が形成されている。

【００５４】

図１２に示すように、第３の比較例にかかる量子デバイス９２は、平面視で、概ね、ジョセフソン接合２００を中心として逆Ｌ字型に形成されている。また、ジョセフソン接合２００の近傍は、平面視で、第１の導体２１０（２１０Ａ）と第２の導体２２０（２２０Ｂ）とが交差することによって、十字型に形成されている。また、第１の導体２１０Ａのジョセフソン接合２００の近傍には、細く伸びるように形成された細幅部２１２Ａが形成されている。また、第２の導体２２０Ｂのジョセフソン接合２００の近傍には、細く伸びるように形成された細幅部２２２Ｂが形成されている。そして、細幅部２１２Ａと細幅部２２２Ｂとが交差することによって、ジョセフソン接合２００が形成されている。なお、第１の導体２１０Ｂには、細幅部は形成されていない。また、第２の導体２２０Ａには、細幅部は形成されていない。

【００５５】

ここで、ジョセフソン接合 200 に対して、ジョセフソン接合 200 を構成する第 1 の導体 210 A が導体層 230 A の方に延びるように形成された側（図 12 の左下側）を、第 1 の側 72 A とする。つまり、第 1 の側 72 A は、図 12 においてジョセフソン接合 200 よりも左側に対応する。また、ジョセフソン接合 200 に対して、ジョセフソン接合 200 を構成する第 2 の導体 220 B が導体層 230 B の方に延びるように形成された側（図 12 の右上側）を、第 2 の側 72 B とする。つまり、第 2 の側 72 B は、図 12 においてジョセフソン接合 200 よりも上側に対応する。なお、後述するように、基板 60 の表面に対する垂直方向（紙面手前から奥に向かう方向）から第 1 の側 72 A の側に傾いた方向である第 1 の方向（矢印 C1 で示す）から斜め蒸着を行うことによって、第 1 の導体 210 が蒸着される。また、基板 60 の表面に対する垂直方向（紙面手前から奥に向かう方向）から第 2 の側 72 B の側に傾いた方向である第 2 の方向（矢印 C2 で示す）から斜め蒸着を行うことによって、第 2 の導体 220 が蒸着される。

10

【0056】

第 1 の側 72 A において、基板 60 及び導体層 230 A に、第 1 の導体 210 A が積層されている。また、第 1 の導体 210 A 及び導体層 230 A に、第 2 の導体 220 A が積層されている。また、導体層 230 A の、基板 60 及び第 1 の導体 210 A と接していない面には、酸化膜（NbOx）が形成されている。また、第 1 の導体 210 A の、基板 60 及び導体層 230 A と接していない面には、酸化膜（AlOx）が形成されている。つまり、第 1 の導体 210 A の、第 2 の導体 220 A 及び第 2 の導体 220 B と接している面には、酸化膜が形成されている。

20

【0057】

一方、第 2 の側 72 B において、基板 60 及び導体層 230 B に、第 1 の導体 210 B が積層されている。また、基板 60 及び第 1 の導体 210 B に、第 2 の導体 220 B が積層されている。ここで、第 1 の導体 210 A の細幅部 212 A の一部である第 1 の導体部分 210 Aa に、酸化膜を介して、第 2 の導体 220 B の細幅部 222 B の一部である第 2 の導体部分 220 Ba が積層されている。第 1 の導体部分 210 Aa に酸化膜（トンネルバリア層）を介して第 2 の導体部分 220 Ba が積層されていることにより、ジョセフソン接合 200 が形成されている。また、導体層 230 B の、基板 60 及び第 1 の導体 210 B と接していない面には、酸化膜（NbOx）が形成されている。また、第 1 の導体 210 B の、基板 60 及び導体層 230 B と接していない面には、酸化膜（AlOx）が形成されている。つまり、第 1 の導体 210 B の、第 2 の導体 220 B と接している面には、酸化膜（AlOx）が形成されている。

30

【0058】

ここで、第 3 の比較例にかかるジョセフソン接合 200 の生成方法の概要について説明する。ジョセフソン接合 200 は、ブリッジレス型による斜め蒸着法を用いて生成する。この方法では、基板 60 上に、予め、第 1 の導体 210 及び第 2 の導体 220 の形状に対応するレジストマスクを設けておく（レジストマスク形成工程）。この状態で、導体層 230 の表面の酸化膜を除去する（酸化膜除去工程）。そして、基板 60 に対する蒸着方向を変えて、2 回、超伝導材料の薄膜（第 1 の導体 210 及び第 2 の導体 220）を蒸着する。つまり、1 回目の蒸着処理で第 1 の導体 210 が蒸着され（第 1 の蒸着処理工程）、2 回目の蒸着処理で第 2 の導体 220 が蒸着される（第 2 の蒸着処理工程）。1 回目の蒸着処理の後で第 1 の導体 210 の表面を酸化させる（酸化工程）。これによって形成された酸化膜は、ジョセフソン接合 200 のトンネルバリア層として機能する。

40

【0059】

また、後述するように、2 回の蒸着処理で互いに同じレジストマスクを使用するため、導体層 230 の上で、対応する形状の超伝導体（第 1 の導体 210 及び第 2 の導体 220）が少しずれた形で重なり合うこととなる。この重なり部分に、意図的に形成されるジョセフソン接合 200 とは異なり、意図せず形成されるスプリアス接合 82 が形成される。つまり、第 1 の側 72 A において、第 1 の導体 210 A と第 2 の導体 220 A とが酸化膜を介して接続された箇所に、スプリアス接合 82 A が形成される。また、第 2 の側 72 B

50

において、第1の導体210Bと第2の導体220Bとが酸化膜を介して接続された箇所に、スプリアス接合82Bが形成される。

【0060】

図13～図15は、第3の比較例にかかる量子デバイス92の製造方法を説明するための図である。図13～図15を用いて、第3の比較例にかかるジョセフソン接合200の生成方法の概要について説明する。ジョセフソン接合200は、ブリッジレス型による斜め蒸着法を用いて生成する。まず、図13に示すように、基板60上に、予め、第1の導体210及び第2の導体220の形状に対応するレジストマスク30を設けておく（レジストマスク形成工程）。レジストマスク30は、ジョセフソン接合200が形成される箇所の周囲において十字型の開口部31Aが形成されるように、レジストマスク部分30a、30b、30c、30dを有する。

10

【0061】

レジストマスク30が配置された基板60を容器内に密閉して真空環境下に置く。そして、導体層230の表面の酸化膜を除去した後で、図13の矢印C1に示す方向からの斜め蒸着により、第1の導体210が蒸着される（第1の蒸着処理工程）。斜め蒸着の方向は、基板60の側から見て、基板60の表面に対する垂直方向に対して例えば45度程度、開口部分31a（後述）の長手方向に沿った方向に傾いた方向である。つまり、垂直方向に対する角度を $\theta 2$ とすると、 $\theta 2 = 45$ 度程度の方向から、超伝導材料が蒸着される。なお、開口部分31aは、レジストマスク部分30aとレジストマスク部分30bとの間の部分、レジストマスク部分30cとレジストマスク部分30dとの間の部分、及びこれらの間の中央部分31cから構成される。図13の例では、第1の蒸着処理工程では、基板60の側から見て、垂直方向に対して、開口部分31aの長手方向に沿った方向のレジストマスク部分30a及びレジストマスク部分30bの側に $\theta 2$ 傾いた方向から、超伝導材料が蒸着される。なお、斜め蒸着の方向の調整は、基板60を回転させることによって行われてもよいし、超伝導材料を射出するノズルの向きを変えることによって行われてもよい。

20

【0062】

ここで、第1の蒸着処理工程では、十字型の開口部31Aのうち、矢印C1に示す方向に沿った方向の、開口部分31aの底部（基板60の表面）に、第1の導体210が蒸着される。つまり、図14を用いて説明するように、第1の蒸着処理工程では、レジストマスク部分30aとレジストマスク部分30cとの間の底部には、超伝導材料は、レジストマスク部分30aに遮蔽されることにより、到達しない。同様に、第1の蒸着処理工程では、レジストマスク部分30bとレジストマスク部分30dとの間の底部には、超伝導材料は、レジストマスク部分30bに遮蔽されることにより、到達しない。

30

【0063】

次に、図6に示した方法と同様にして、第1の導体210の表面を酸化する（酸化工程）。具体的には、基板60等が配置された容器に酸素ガスを封入することで、第1の導体210の表面が酸化される。これにより、第1の導体210Aの表面に酸化膜（ AlO_x ）が形成される。また、第1の導体210Bに表面に酸化膜（ AlO_x ）が形成される。さらに、図13には図示されていないが、導体層230の第1の導体210及びレジストマスク30に覆われていない箇所に、酸化膜（ NbO_x ）が形成される。

40

【0064】

次に、図13の矢印C2に示す方向からの斜め蒸着により、第2の導体220が蒸着される（第2の蒸着処理工程）。斜め蒸着の方向は、基板60の側から見て、基板60の表面に対する垂直方向に対して例えば45度程度、開口部分31b（後述）の長手方向に沿った方向に傾いた方向である。つまり、垂直方向に対する角度を $\theta 2$ とすると、 $\theta 2 = 45$ 度程度の方向から、超伝導材料を蒸着する。なお、開口部分31bは、レジストマスク部分30aとレジストマスク部分30cとの間の部分、レジストマスク部分30bとレジストマスク部分30dとの間の部分、及びこれらの間の中央部分31cから構成される。図13の例では、第2の蒸着処理工程では、基板60の側から見て、垂直方向に対して、

50

開口部分 3 1 b の長手方向に沿った方向のレジストマスク部分 3 0 b 及びレジストマスク部分 3 0 d の側に θ 2 傾いた方向から、超伝導材料が蒸着される。斜め蒸着の方向を C 1 の方向から C 2 の方向に変更することは、例えば、第 1 の蒸着処理工程の後で、矢印 R 1 の方向に基板 6 0 を 9 0 度回転させることによって行われてもよい。

【0065】

ここで、第 2 の蒸着処理工程では、十字型の開口部 3 1 A のうち、矢印 C 2 に示す方向に沿った方向の、開口部分 3 1 b の底部に、第 2 の導体 2 2 0 が蒸着される。つまり、図 1 4 を用いて説明するように、第 2 の蒸着処理工程では、レジストマスク部分 3 0 a とレジストマスク部分 3 0 b との間の底部には、超伝導材料は、レジストマスク部分 3 0 b に遮蔽されることにより、到達しない。同様に、第 2 の蒸着処理工程では、レジストマスク部分 3 0 c とレジストマスク部分 3 0 d との間の底部には、超伝導材料は、レジストマスク部分 3 0 d に遮蔽されることにより、到達しない。なお、中央部分 3 1 c では、既に第 1 の導体 2 1 0 が積層されているので、第 2 の導体 2 2 0 が、第 1 の導体 2 1 0 に積層されることとなる。そして、図 1 5 に示すように、レジストマスク 3 0 が除去される（リフトオフ工程）。

【0066】

図 1 4 に示すように、レジストマスク 3 0 において、レジストマスク部分 3 0 x とレジストマスク部分 3 0 y との間を開口部 3 1 X とする。この場合、開口部 3 1 X の蒸着の方向（矢印 C で示す）に対応する方向の幅 W が狭い場合には、開口部 3 1 X の底部 3 1 X b は、レジストマスク部分 3 0 x の陰になる。言い換えると、底部 3 1 X b は、レジストマスク部分 3 0 x によって遮蔽される。したがって、矢印 C の方向に射出された超伝導材料 2 1 0 X は、レジストマスク 3 0 の上面、及び、レジストマスク部分 3 0 y の開口部 3 1 X における壁面に積層されるのみであって、底部 3 1 X b に積層されない。

【0067】

したがって、図 1 5 に示すように、第 1 の導体 2 1 0 A と第 2 の導体 2 2 0 B とが十字に交差した形状で形成される。そして、中央部分 3 1 c において第 1 の導体 2 1 0 A と第 2 の導体 2 2 0 とが重なった部分に、ジョセフソン接合 2 0 0 が形成される。また、レジストマスク 3 0 の開口部 3 1 が狭い箇所において、ジョセフソン接合 2 0 0 を構成する細幅部 2 1 2 A（第 1 の導体 2 1 0 A）及び細幅部 2 2 2 B（第 2 の導体 2 2 0 B）が形成される。

【0068】

なお、第 3 の比較例にかかる量子デバイス 9 2 の回路構成は、図 9 に示したものと実質的に同様である。つまり、第 1 の側 7 2 A では、ジョセフソン接合 2 0 0 から導体層 2 3 0 A との間の電気的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合 8 2 A を経由する第 1 の経路以外にも、第 2 の経路が存在する。すなわち、第 1 の経路は、ジョセフソン接合 2 0 0 が、第 1 の導体 2 1 0 A とスプリアス接合 8 2 A と第 2 の導体 2 2 0 A と導体層 2 3 0 A に形成された酸化膜とを介して、導体層 2 3 0 A と接続される経路である。一方、第 2 の経路は、ジョセフソン接合 2 0 0 が第 1 の導体 2 1 0 A と接続され、第 1 の導体 2 1 0 A と導体層 2 3 0 A とが直接接続される経路である。つまり、スプリアス接合 8 2 A の両端の導体が短絡しており、スプリアス接合 8 2 A は電気的に無効化される。したがって、スプリアス接合 8 2 A に発生する電界は大きくなりませんので、スプリアス接合 8 2 A はロスの発生に寄与しないこととなる。

【0069】

一方、第 2 の側 7 2 B では、ジョセフソン接合 2 0 0 から導体層 2 3 0 B との間の電気的な経路は、キャパシタとして機能するスプリアス接合 8 2 B を経由するものしか存在しない。すなわち、ジョセフソン接合 2 0 0 と第 2 の導体 2 2 0 B とが接続され、酸化膜に対応するスプリアス接合 8 2 B を介して第 2 の導体 2 2 0 B と第 1 の導体 2 1 0 B とが接続され、第 1 の導体 2 1 0 B が導体層 2 3 0 B に接続されている。したがって、スプリアス接合 8 2 B に発生する電界が大きくなるので、スプリアス接合 8 2 B はロスの発生に寄与することとなる。

【0070】

したがって、第3の比較例では、デコヒーレンスを抑制することが困難である。これに対し、上述したように、本実施の形態にかかる量子デバイス1では、ジョセフソン接合10を構成する第1の導体2と導体層6とが、超伝導コンタクトを形成している。同様に、ジョセフソン接合10を構成する第2の導体4と導体層6とが、超伝導コンタクトを形成している。これにより、本実施の形態にかかる量子デバイス1は、性能の劣化を抑制することが可能となる。つまり、本実施の形態にかかる量子デバイス1は、デコヒーレンスを抑制することが可能である。

【0071】

(実施の形態1)

以下、実施形態について、図面を参照しながら説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。

【0072】

図16は、実施の形態1にかかる量子デバイス50を示す図である。図16は、実施の形態1にかかる量子デバイス50の断面図である。実施の形態1にかかる量子デバイス50は、第2の比較例と同様に、基板60と、複数の第1の導体110(110A, 110B)と、複数の第2の導体120(120A, 120B)と、超伝導回路を構成する導体層130(130A, 130B)とを有する。第1の導体110、第2の導体120及び導体層130の構成については、特記しない限り、第2の比較例と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

【0073】

第1の導体110は、図1に示した第1の導体2に対応する。第1の導体110は、導体層130に積層されている。なお、導体層130は、図1に示した導体層6に対応する。また、第2の導体120は、図1に示した第2の導体4に対応する。第2の導体120は、第1の導体110に積層されている。第1の導体110、第2の導体120及び導体層130は、後で列挙するような超伝導材料で形成されている(後述する他の実施の形態でも同様)。例えば、第1の導体110及び第2の導体120は、アルミニウム(Al)で形成されている。また、例えば、導体層130(第3の導体)は、ニオブ(Nb)で形成されている。しかしながら、第1の導体110及び第2の導体120は、アルミニウム(Al)で形成されていなくてもよい。また、導体層130は、ニオブ(Nb)で形成されていなくてもよい。

【0074】

また、実施の形態1にかかる量子デバイス50は、さらに、接続導体150(150A, 150B)を有する。接続導体150は、後で列挙するような超伝導材料で形成されている(後述する他の実施の形態でも同様)。例えば、接続導体150は、アルミニウム(Al)等の超伝導材料で形成されている。また、第1の導体110と第2の導体120との間には、第1の導体110の表面が酸化されることにより酸化膜140(140A, 140B)が形成されている。酸化膜140は、図1に示した酸化膜8に対応する。また、第1の導体110(110A)の一部(第1の導体部分110Aa)と、第2の導体120(120B)の一部(第2の導体部分120Ba)と、酸化膜140(140A)とによって、ジョセフソン接合100が形成されている。ジョセフソン接合100は、図1に示したジョセフソン接合10に対応する。ジョセフソン接合100の構成については、第1の比較例及び第2の比較例のものと実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

【0075】

ここで、本実施の形態では、基板60には、例えば、シリコン基板が用いられるが、基板の材料はこれに限られない。例えば、基板60には、サファイヤ基板又はガラス基板などが用いられてもよい。また、超伝導材料としては、例えば、ニオブ、ニオブ窒化物、アルミニウム、インジウム、鉛、錫、レニウム、チタン、チタン窒化物、タンタル、または、これらのいずれかを含む合金が挙げられる。なお、必ずしも、導体層130の全てが、

10

20

30

40

50

超伝導材料により実現されていなくてもよく、導体層 130 の少なくとも一部に常伝導材料が用いられてもよい。常伝導材料としては、例えば、銅、銀、金、白金、または、これらのいずれかを含む合金が挙げられる。なお、超伝導状態を実現するため、冷凍機により実現される例えば 10 mK（ミリケルビン）程度の温度環境において、量子デバイス 50 は利用される。これらのことは、他の実施の形態でも同様である。

【0076】

また、第 2 の比較例と同様に、第 1 の側 70 A において、基板 60 及び導体層 130 A に、第 1 の導体 110 A が積層されている。また、第 1 の導体 110 A 及び導体層 130 A に、第 2 の導体 120 A が積層されている。また、導体層 130 A 及び第 2 の導体 120 A に、接続導体 150 A が積層されている。

10

【0077】

また、第 2 の比較例と同様に、導体層 130 A の、第 1 の導体 110 A 及び第 2 の導体 120 A と接している面には、酸化膜 132 A (NbO_x) が形成されている。また、第 2 の比較例と同様に、第 1 の導体 110 A の、基板 60 及び導体層 130 A と接していない面（第 2 の導体 120 A 及び第 2 の導体 120 B と接している面）には、酸化膜 140 A (AlO_x) が形成されている。

【0078】

ここで、実施の形態 1 では、第 1 の導体 110 A には、第 2 の導体 120 A に覆われていない突出部 112 A（第 1 の突出部）が形成されている。突出部 112 A は、第 1 の導体 110 A と一体に形成されている。突出部 112 A は、図 1 の突出部 2a に対応する。矢印 X1 で示すように、この突出部 112 A に、接続導体 150 A が積層されて接続されている（超伝導コンタクト）。突出部 112 A は、レジストマスクの形状を工夫することによって、形成され得る。このように、突出部 112 A が接続導体 150 A と接続されていることによって、スプリアス接合 80 A の両端の導体（第 1 の導体 110 A 及び導体層 130 A）が短絡する。したがって、スプリアス接合 80 A は電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合 80 A に発生する電界は大きくなりませんので、スプリアス接合 80 A はロスの発生に寄与しないこととなる。

20

【0079】

一方、第 2 の側 70 B において、第 2 の比較例と同様に、基板 60 及び導体層 130 B に、第 1 の導体 110 B が積層されている。また、基板 60 及び第 1 の導体 110 B に、第 2 の導体 120 B が積層されている。また、導体層 130 B、第 1 の導体 110 B 及び第 2 の導体 120 B に、接続導体 150 B が積層されている。これにより、矢印 X2 で示すように、第 2 の導体 120 B が接続導体 150 B と接続される。したがって、第 2 の導体 120 B は、導体層 130 B と、接続導体 150 B を介して接続されている。例えば、第 2 の導体 120 B は、導体層 130 B と、酸化膜（誘電体）を介さないで接続されていてもよい。つまり、スプリアス接合 80 B の両端の導体（第 2 の導体 120 B 及び導体層 130 B）が接続導体 150 B によって短絡するので、スプリアス接合 80 B は電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合 80 B に発生する電界は大きくなりませんので、スプリアス接合 80 B はロスの発生に寄与しないこととなる。

30

【0080】

また、第 2 の比較例と同様に、導体層 130 B の、第 1 の導体 110 B と接している面及び露出している面には、酸化膜 132 B (NbO_x) が形成されている。また、第 1 の導体 110 B の、第 2 の導体 120 B と接している面には、酸化膜 140 B (AlO_x) が形成されている。ここで、実施の形態 1 では、第 2 の比較例と同様に、第 1 の導体 110 の蒸着処理の前に導体層 130 に対して酸化膜除去工程が実行されない。そして、接続導体 150 を形成することで、第 1 の導体 110 の蒸着処理の前に酸化膜除去工程を実行しなくても、上述したように、導体層 130 と超伝導体（第 1 の導体 110 及び第 2 の導体 120）との接続（超伝導コンタクト）を形成する。

40

【0081】

上述したように、実施の形態 1 にかかる量子デバイス 50 では、突出部 112 A と導体

50

層130Aとが、接続導体150Aを介して接続されている。これにより、スプリアス接合80Aの両端の導体（第1の導体110A及び導体層130A）の接続経路に、酸化膜140, 132を介さないものが存在することとなる。つまり、スプリアス接合80Aの両端の導体（第1の導体110A及び導体層130A）が短絡する。したがって、上述したように、スプリアス接合80Aはロスの発生に寄与しないこととなる。また、実施の形態1にかかる量子デバイス50では、第2の導体120Bと導体層130Bとが、接続導体150Bを介して接続されている。これにより、スプリアス接合80Bの両端の導体（第2の導体120B及び導体層130B）の接続経路に、酸化膜140, 132を介さないものが存在することとなる。つまり、スプリアス接合80Bの両端の導体（第2の導体120B及び導体層130B）が短絡する。したがって、上述したように、スプリアス接合80Bはロスの発生に寄与しないこととなる。したがって、実施の形態1にかかる量子デバイス50は、性能の劣化を抑制することが可能となる。

10

【0082】

また、実施の形態1にかかる量子デバイス50では、突出部112Aと接続導体150Aとが接続されることによって、第1の導体110Aと接続導体150Aとを接続させるための別途の工程が不要となる。つまり、第2の比較例から工程を実質的に増加させることなく、実施の形態1にかかる量子デバイス50を製造することができる。したがって、実施の形態1では、簡易な方法で、性能の劣化を抑制した量子デバイス50を製造することが可能となる。

【0083】

20

図17～図24は、実施の形態1にかかる量子デバイス50の製造方法を示す工程図である。まず、図17に示すように、基板60を用意し、基板60に導体層130を成膜する（導体層成膜工程）。導体層130の成膜は、例えば、スパッタリングによって行われ得る。あるいは、導体層130の成膜は、蒸着又はCVDによって行われてもよい。そして、導体層130への回路パターンの形成は、例えば、光学的リソグラフィおよび反応性イオンエッチングの組み合わせによって行われ得る。なお、光学的リソグラフィに代えて電子線描画法等を用いてもよい。また、反応性イオンエッチングに代えてウェットエッチング等を用いてもよい。なお、導体層130の表面（基板60に接していない面）には、酸化膜132（NbOx）が形成されている。

【0084】

30

次に、図18に示すように、レジストマスク300（レジストパターン）が基板60の上に形成される（レジストマスク形成工程）。このとき、基板60等は真空環境下に置かれる。つまり、基板60等は、内部が真空状態となった容器内に密閉された状態で配置されている。レジストマスク300のレジストパターンによって、開口部302（302A, 302B）が形成される。なお、以後、レジストマスク300を除去するまで、開口部302と対向する箇所以外の基板60及び導体層130は、レジストマスク300で覆われている。また、レジストマスク300は、レジストブリッジ300bを有する。これによって、開口部302が2つの開口部302A, 302Bに分離されている。

【0085】

40

また、実施の形態1では、レジストマスク300は、第1の導体110Aが突出部112Aを有するように形成されている。つまり、実施の形態1にかかるレジストマスク300は、突出部112Aを有する第1の導体110と第2の導体120とによってジョセフソン接合100を形成するように、形成されている。

【0086】

実施の形態1では、この段階では、第1の比較例と異なり、酸化膜除去工程が実行されない。この状態で、矢印A1に示す方向からの斜め蒸着により、第1の導体110が蒸着される（第1の蒸着処理工程）。斜め蒸着の方向は、基板60の側から見て、基板60に対する垂直方向（断面図における下向き方向）に対して例えば20度程度、第1の側70Aの方に傾いた方向である。つまり、垂直方向に対する第1の側70Aの方に傾いた角度を $\theta 1$ とすると、 $\theta 1 = 20$ 度程度の方向から、超伝導材料が蒸着される。

50

【0087】

このようにして、開口部302Aを介して、第1の導体110Aが蒸着される。また、開口部302Bを介して、第1の導体110Bが蒸着される。また、レジストマスク300には、第1の導体110とともに蒸着された超伝導材料110X (Al) が積層される。また、レジストブリッジ300bによって、第1の導体110Aと第1の導体110Bとを分離する隙間G1が形成される。また、酸化膜除去工程が実行されなかったため、第1の導体110Aと導体層130Aとの間には、酸化膜132Aが形成されている。また、第1の導体110Bと導体層130Bとの間には、酸化膜132Bが形成されている。

【0088】

次に、図19に示すように、第1の比較例(図6)と同様にして、第1の導体110の表面を酸化する(酸化工程)。これにより、第1の導体110Aの表面に酸化膜140A (AlO_x) が形成される。また、第1の導体110Bの表面に酸化膜140B (AlO_x) が形成される。

10

【0089】

次に、図20に示すように、第1の比較例(図7)と同様にして、矢印A2に示す方向からの斜め蒸着により、第2の導体120が蒸着される(第2の蒸着処理工程)。斜め蒸着の方向は、基板60の側から見て、基板60に対する垂直方向(断面図における下向き方向)に対して例えば20度程度、第2の側70Bの方に傾いた方向である。つまり、垂直方向に対する第2の側70Bの方に傾いた角度を $\theta 1$ とすると、 $\theta 1 = 20$ 度程度の方向から、超伝導材料を蒸着する。

20

【0090】

このとき、開口部302Aを介して、第2の導体120Aが蒸着される。また、開口部302Bを介して、第2の導体120Bが蒸着される。また、レジストマスク300には、第2の導体120とともに蒸着された超伝導材料120X (Al) が積層される。また、レジストブリッジ300bによって、第1の導体110A上に、第2の導体120Aと第2の導体120Bとを分離する隙間G2が形成される。また、第1の導体110Aと第2の導体120Bとが重なる箇所に、ジョセフソン接合100が形成される。

【0091】

さらに、実施の形態1では、開口部302Aを形成する第1の側70Aの側の壁部303Aの近傍には、第1の蒸着処理工程において超伝導材料が到達するので、第1の導体110Aが成膜されている。一方、壁部303Aの近傍では、第2の蒸着処理工程において、壁部303Aによって遮蔽されることで、第1の導体110Aの上に第2の導体120Aが成膜されない箇所がある。この、第2の導体120Aが成膜されない箇所に、第1の導体110Aの突出部112Aが形成される。

30

【0092】

次に、図21に示すように、レジストマスク300が除去される(リフトオフ工程)。これにより、レジストマスク300と、レジストマスク300に積層された余分な超伝導材料110X, 120Xが除去される。このとき、真空状態(密閉状態)が大気環境に開放される。つまり、基板60を配置する装置は、真空状態(密閉状態)から大気環境下に置かれる。なお、大気環境下であるので、第2の導体120の表面に、酸化膜142が形成される。つまり、第2の導体120Aの表面に酸化膜142Aが形成され、第2の導体120Bの表面に酸化膜142Bが形成される。

40

【0093】

次に、図22に示すように、接続導体150を形成するためのレジストマスク400 (レジストパターン) が形成される(接続導体用レジストマスク形成工程)。このとき、基板60等は真空環境下に置かれる。つまり、基板60等は、内部が真空状態となった容器内に密閉された状態で配置されている。レジストマスク400のレジストパターンによって、開口部402 (402A, 402B) が形成される。レジストマスク400において、第1の側70Aに開口部402Aが設けられ、第2の側70Bに開口部402Bが設けられる。なお、以後、レジストマスク400を除去するまで、開口部402と対向する箇

50

所以外の基板 60 等は、レジストマスク 400 で覆われている。なお、後述するように、開口部 402 に対向する箇所に、接続導体 150 が形成される。

【0094】

この状態で、第 1 の導体 110、第 2 の導体 120 及び導体層 130 の、レジストマスク 400 に覆われずに露出している箇所に形成されている酸化膜を除去する（酸化膜除去工程）。これにより、レジストマスク 400 に覆われていない、導体層 130 の表面の酸化膜 132、第 2 の導体 120 の表面の酸化膜 142 及び第 1 の導体 110 の表面の酸化膜 140 が除去される。酸化膜 132、140、142 の除去は、例えば、矢印 B で示すように開口部 402 を介してイオンビームを照射する、イオンミリング等によって行われる。なお、酸化膜 132、140、142 を除去するのは、接続導体 150 によって導体層 130 と超伝導体（第 1 の導体 110 及び第 2 の導体 120）との接続（超伝導コンタクト）を形成するためである。

10

【0095】

次に、図 23 に示すように、開口部 402 を介して接続導体 150 が蒸着される（接続導体蒸着工程）。なお、接続導体 150 の蒸着処理は、斜め蒸着である必要はない。これにより、開口部 402 A を介して、接続導体 150 A が成膜される。また、開口部 402 B を介して、接続導体 150 B が成膜される。また、レジストマスク 400 には、接続導体 150 とともに蒸着された超伝導材料 150 X（Al）が積層される。

【0096】

開口部 402 A に対向する箇所に接続導体 150 A が成膜されることによって、第 1 の導体 110 A に形成された突出部 112 A が、接続導体 150 A と、直接、接続される（超伝導コンタクト）。また、導体層 130 A が、接続導体 150 A と、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第 1 の導体 110 A に形成された突出部 112 A と導体層 130 A とが、導体（接続導体 150 A）を介して接続される。なお、第 2 の導体 120 A が、接続導体 150 A と、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第 2 の導体 120 A と導体層 130 A とが、導体（接続導体 150 A）を介して接続される。

20

【0097】

また、開口部 402 B に対向する箇所に、接続導体 150 B が成膜されることによって、第 2 の導体 120 B が、接続導体 150 B と、直接、接続される（超伝導コンタクト）。また、導体層 130 B が、接続導体 150 B と、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第 2 の導体 120 B と導体層 130 B とが、導体（接続導体 150 B）を介して接続される。なお、第 1 の導体 110 B が、接続導体 150 B と、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第 1 の導体 110 B と導体層 130 B とが、導体（接続導体 150 B）を介して接続される。

30

【0098】

次に、図 24 に示すように、レジストマスク 400 が除去される（リフトオフ工程）。これにより、レジストマスク 400 と、レジストマスク 400 に積層された余分な超伝導材料 150 X が除去される。このようにして、図 16 に示した、実施の形態 1 にかかる量子デバイス 50 が製造される。なお、図 18～図 20 の工程は、同一の密閉状態で実行される。つまり、図 18～図 20 の工程において、密閉状態は大気環境に開放されない。また、図 22～図 23 の工程は、同一の密閉状態で実行される。つまり、図 22～図 23 の工程において、密閉状態は大気環境に開放されない。

40

【0099】

（実施の形態 2）

次に、実施の形態 2 について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。実施の形態 2 では、接続導体 150 が形成される位置が、実施の形態 1 と異なる。

【0100】

50

図 25 は、実施の形態 2 にかかる量子デバイス 50 を示す図である。図 25 は、実施の形態 2 にかかる量子デバイス 50 の断面図である。実施の形態 2 にかかる量子デバイス 50 は、実施の形態 1 と同様に、基板 60 と、複数の第 1 の導体 110 (110A, 110B) と、複数の第 2 の導体 120 (120A, 120B) と、超伝導回路を構成する導体層 130 (130A, 130B) とを有する。第 1 の導体 110、第 2 の導体 120 及び導体層 130 の構成については、特記しない限り、実施の形態 1 と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

【0101】

ここで、実施の形態 2 では、量子デバイス 50 の説明の便宜のため、XYZ 直交座標軸を導入している。図 25 には、右手系の XYZ 座標系が示されている。基板 60 の導体層 130 及び超伝導体等が実装された面に沿った面を XY 平面とし、この面に直交する方向を Z 軸方向とする。図 25 における上方を +Z 方向とし、図 25 における下方を -Z 方向とする。なお、上方及び下方は、説明の便宜のためであり、実際の量子デバイス 50 を使用する際の配置される方向を示すものではない。また、XYZ 直交座標軸の原点の位置は任意である。また、XY 平面に沿った方向 (XY 方向) は、図 25 の横方向に対応する。また、Z 軸方向は、図 25 の縦方向 (基板 60 の表面に対する垂直方向) に対応する。また、ジョセフソン接合 100 から第 1 の側 70A を見た方向を +Y 方向とし、ジョセフソン接合 100 から第 2 の側 70B を見た方向を -Y 方向とする。また、紙面奥から手前に向かう方向を +X 方向とする。これらのことは、以下に説明する他のブリッジ型の実施の形態でも同様である。

【0102】

第 1 の導体 110 は、導体層 130 に積層されている。第 2 の導体 120 は、第 1 の導体 110 に積層されている。第 1 の導体 110、第 2 の導体 120 及び導体層 130 は、超伝導材料で形成されている。また、第 1 の導体 110 と第 2 の導体 120 との間には、酸化膜 140 (140A, 140B) が形成されている。また、第 1 の導体 110 (110A) の一部 (第 1 の導体部分 110Aa) と、第 2 の導体 120 (120B) の一部 (第 2 の導体部分 120Ba) と、酸化膜 140 (140A) とによって、ジョセフソン接合 100 が形成されている。ジョセフソン接合 100 の構成については、実施の形態 1、第 1 の比較例及び第 2 の比較例のものと実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

【0103】

実施の形態 2 にかかる量子デバイス 50 は、さらに、接続導体 152 (152A, 152B) を有する。接続導体 152 は、超伝導材料で形成されている。接続導体 152 は、例えば、アルミニウム (Al) で形成されてもよい。接続導体 152A は、第 1 の側 70A において、第 1 の導体 110A 及び導体層 130A に、直接、接続されている。これにより、接続導体 152A は、第 1 の側 70A において、第 1 の導体 110A と導体層 130A とを接続する (超伝導コンタクト)。なお、実施の形態 2 では、接続導体 152A は、第 1 の側 70A において、第 2 の導体 120A と接続されていない。

【0104】

また、接続導体 152B は、第 2 の側 70B において、第 2 の導体 120B 及び導体層 130B に、直接、接続されている。これにより、接続導体 152B は、第 2 の側 70B において、第 2 の導体 120B と導体層 130B とを接続する (超伝導コンタクト)。なお、実施の形態 2 では、接続導体 152B は、第 2 の側 70B において、第 1 の導体 110B と接続されていない。

【0105】

図 26 は、実施の形態 2 にかかる量子デバイス 50 の実現例を示す図である。図 26 は、実施の形態 2 にかかる量子デバイス 50 が、ブリッジ型によって製造された例を示す。なお、図 26 の平面図においても、図 25 (断面図) で定義されたものに対応する XYZ 直交座標軸を導入している。

【0106】

第1の側70Aにおいて、第1の導体110Aは、+Y方向の端部に、X軸方向に突出する突出部114A（第1の突出部）を有する。また、第1の側70Aにおいて、第2の導体120Aは、+Y方向の端部に、X軸方向に突出する突出部124Aを有する。突出部114Aは、第1の導体110Aに積層されている第2の導体120Aに覆われないように突出している。ここで、突出部124Aは、突出部114Aの近傍に設けられている。なお、実施の形態2では、突出部114Aは、+X方向に1つ、-X方向に1つ設けられている。突出部124Aについても同様である。なお、上述したように、第1の導体110A及び第2の導体120Aは、同じレジストマスクを基板60に対して固定した状態で用いることによって形成されるので、突出部114Aと突出部124Aとで、これらの形状及び数は互に対応することとなる。

10

【0107】

接続導体152Aは、突出部114A及び導体層130Aに、直接、接続されている（超伝導コンタクト）。これにより、第1の側70Aにおいて、第1の導体110Aと導体層130Aとが、直接、接続されている。なお、実施の形態2では、接続導体152Aは、突出部124Aには接続されていない。

【0108】

また、第2の側70Bにおいて、第1の導体110Bは、-Y方向の端部に、X軸方向に突出する突出部114Bを有する。また、第2の側70Bにおいて、第2の導体120Bは、-Y方向の端部に、X軸方向に突出する突出部124Bを有する。突出部124Bは、第2の導体120Bが積層している第1の導体110BよりもX軸方向に突出している。ここで、突出部124Bは、突出部114Bの近傍に設けられている。なお、実施の形態2では、突出部114Bは、+X方向に1つ、-X方向に1つ設けられている。突出部124Bについても同様である。なお、上述したように、第1の導体110B及び第2の導体120Bは、同じレジストマスクを基板60に対して固定した状態で用いることによって形成されるので、突出部114Bと突出部124Bとで、これらの形状及び数は互に対応することとなる。

20

【0109】

接続導体152Bは、突出部124B及び導体層130Bに、直接、接続されている（超伝導コンタクト）。これにより、第2の側70Bにおいて、第2の導体120Bと導体層130Bとが、直接、接続されている。なお、実施の形態2では、接続導体152Bは、突出部114Bには接続されていない。

30

【0110】

図27は、図26に示した量子デバイス50の製造方法を説明するための図である。実施の形態2にかかる量子デバイス50は、実施の形態1と実質的に同様の方法（図17～図24）で製造される。しかしながら、実施の形態2で使用するレジストマスクの形状が、実施の形態1で使用するレジストマスクの形状と異なる。

【0111】

図27には、第1の導体110及び第2の導体120を形成するために使用されるレジストマスク310の開口部312（312A，312B）が、太い一点鎖線で示されている。開口部312と対向する箇所以外の領域が、レジストマスク310で覆われている。第1の側70Aに開口部312Aが形成され、第2の側70Bに開口部312Bが形成されている。

40

【0112】

また、開口部312Aの+Y方向の端部には、X軸方向に凹んだ凹部314Aが設けられている。凹部314Aの形状及び数は、突出部114A，124Aの形状及び数に対応する。また、開口部312Bの-Y方向の端部には、X軸方向に凹んだ凹部314Bが設けられている。凹部314Bの形状及び数は、突出部114B，124Bの形状及び数に対応する。

【0113】

実施の形態2では、実施の形態1の場合と同様に、導体層成膜工程（図17）の後、レ

50

ジストマスク形成工程（図 18）において、レジストマスク 310 が基板 60 の上に形成される。そして、第 1 の蒸着処理工程（図 18）において、基板 60 の側から見て、 $-Z$ 方向に対して $+Y$ 方向に角度 θ_1 傾いた方向から、第 1 の導体 110 が蒸着される。具体的には、開口部 312A を介して、第 1 の導体 110A が蒸着される。また、開口部 312B を介して、第 1 の導体 110B が蒸着される。このとき、凹部 314A に対応する形状の突出部 114A が形成される。また、凹部 314B に対応する形状の突出部 114B が形成される。

【0114】

そして、酸化工程（図 19）の後、第 2 の蒸着処理工程（図 20）において、基板 60 の側から見て、 $-Z$ 方向に対して $-Y$ 方向に角度 θ_1 傾いた方向から、第 2 の導体 120 が蒸着される。具体的には、開口部 312A を介して、第 2 の導体 120A が蒸着される。また、開口部 312B を介して、第 2 の導体 120B が蒸着される。このとき、凹部 314A に対応する形状の突出部 124A が形成される。また、凹部 314B に対応する形状の突出部 124B が形成される。

【0115】

次に、リフトオフ工程（図 21）においてレジストマスク 310 が除去された後、接続導体 152 を形成するためのレジストマスクが形成される（図 22）。なお、接続導体 152 を形成するためのレジストマスクは、接続導体 152 が形成されている位置と Z 軸方向に対向する位置に、開口部が設けられている。そして、酸化膜除去工程（図 22）の後、接続導体蒸着工程（図 23）において、接続導体 152 が形成される。具体的には、第 1 の側 70A で、接続導体 152A が、突出部 124A に接しないように、突出部 114A 及び導体層 130A に積層される。また、第 2 の側 70B で、接続導体 152B が、突出部 114B に接しないように、突出部 124B 及び導体層 130B に積層される。これにより、第 1 の側 70A で、突出部 114A と導体層 130A とが、接続導体 152A によって接続される。また、第 2 の側 70B で、突出部 124B（第 2 の導体 120B）と導体層 130B とが、接続導体 152B によって接続される。

【0116】

実施の形態 2 では、第 1 の側 70A で第 1 の導体 110A（突出部 114A）と導体層 130A とが接続され、第 2 の側 70B で第 2 の導体 120B（突出部 124B）と導体層 130B とが接続されている。ここで、ジョセフソン接合 100 を構成しているのは、第 1 の導体 110A 及び第 2 の導体 120B である。そして、実施の形態 2 では、ジョセフソン接合 100 を構成しない第 2 の導体 120A は、接続導体 152A と接続されていない。同様に、ジョセフソン接合 100 を構成しない第 1 の導体 110B は、接続導体 152B と接続されていない。

【0117】

ここで、第 1 の側 70A において、第 1 の導体 110A と導体層 130A とを接続する接続導体 152A に、ジョセフソン接合 100 を構成しない第 2 の導体 120A が接続されると、コヒーレンスが低下するおそれがある。すなわち、この場合、ジョセフソン接合 100 を構成しない第 2 の導体 120A が第 1 の導体 110A と導体層 130A との間の電気的なパスに接続されてしまうので、スプリアス接合 80A を完全に無効化できない可能性がある。したがって、スプリアス接合 80A がロスの発生に寄与する可能性を排除できない。同様に、第 2 の側 70B において、第 2 の導体 120B と導体層 130B とを接続する接続導体 152B に、ジョセフソン接合 100 を構成しない第 1 の導体 110B が接続されると、コヒーレンスが低下するおそれがある。すなわち、この場合、ジョセフソン接合 100 を構成しない第 1 の導体 110B が第 2 の導体 120B と導体層 130B との間の電気的なパスに接続されてしまうので、スプリアス接合 80B を完全に無効化できない可能性がある。したがって、スプリアス接合 80B がロスの発生に寄与する可能性を排除できない。

【0118】

これに対し、上述したように、実施の形態 2 にかかる量子デバイス 50 では、ジョセフ

ソン接合 100 を構成しない第 2 の導体 120 A は、接続導体 152 A と接続されていない。同様に、ジョセフソン接合 100 を構成しない第 1 の導体 110 B は、接続導体 152 B と接続されていない。したがって、実施の形態 2 では、スプリアス接合 80 を無効化できる可能性が高い。したがって、実施の形態 2 にかかる量子デバイス 50 は、コヒーレンス（性能）の劣化をさらに抑制することが可能となる。

【0119】

（実施の形態 3）

次に、実施の形態 3 について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。実施の形態 3 では、接続導体 150 が形成される位置が、実施の形態 2 と異なる。

【0120】

図 28 は、実施の形態 3 にかかる量子デバイス 50 を示す図である。図 28 は、実施の形態 3 にかかる量子デバイス 50 の断面図である。実施の形態 3 にかかる量子デバイス 50 は、実施の形態 2 と同様に、基板 60 と、第 1 の導体 110（110 A，110 B）と、第 2 の導体 120（120 A，120 B）と、超伝導回路を構成する導体層 130（130 A，130 B）とを有する。第 1 の導体 110、第 2 の導体 120 及び導体層 130 の構成については、特記しない限り、実施の形態 2 と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。また、実施の形態 3 においても、実施の形態 2 で導入した XYZ 直交座標軸を導入する。

【0121】

第 1 の導体 110 は、導体層 130 に積層されている。第 2 の導体 120 は、第 1 の導体 110 に積層されている。第 1 の導体 110、第 2 の導体 120 及び導体層 130 は、超伝導材料で形成されている。また、第 1 の導体 110 と第 2 の導体 120 との間には、酸化膜 140（140 A，140 B）が形成されている。また、第 1 の導体 110（110 A）の一部（第 1 の導体部分 110 A a）と、第 2 の導体 120（120 B）の一部（第 2 の導体部分 120 B a）と、酸化膜 140（140 A）とによって、ジョセフソン接合 100 が形成されている。ジョセフソン接合 100 の構成については、実施の形態 2 のものと実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

【0122】

実施の形態 3 にかかる量子デバイス 50 は、さらに、接続導体 154（154 A，154 B）を有する。接続導体 154 は、超伝導材料で形成されている。接続導体 154 は、例えば、アルミニウム（Al）で形成されてもよい。接続導体 154 A は、第 1 の側 70 A において、第 1 の導体 110 A 及び導体層 130 A に、直接、接続されている。これにより、接続導体 154 A は、第 1 の側 70 A において、第 1 の導体 110 A と導体層 130 A とを接続する（超伝導コンタクト）。また、接続導体 154 A は、第 1 の側 70 A において、第 2 の導体 120 A 及び導体層 130 A に、直接、接続されている。これにより、接続導体 154 A は、第 1 の側 70 A において、第 2 の導体 120 A と導体層 130 A とを接続する（超伝導コンタクト）。

【0123】

また、接続導体 154 B は、第 2 の側 70 B において、第 2 の導体 120 B 及び導体層 130 B に、直接、接続されている。これにより、接続導体 154 B は、第 2 の側 70 B において、第 2 の導体 120 B と導体層 130 B とを接続する（超伝導コンタクト）。また、接続導体 154 B は、第 2 の側 70 B において、第 1 の導体 110 B と及び導体層 130 B に、直接、接続されている。これにより、接続導体 154 B は、第 2 の側 70 B において、第 1 の導体 110 B と導体層 130 B とを接続する（超伝導コンタクト）。

【0124】

図 29 は、実施の形態 3 にかかる量子デバイス 50 の実現例を示す図である。図 29 は、実施の形態 3 にかかる量子デバイス 50 の平面図である。図 29 は、実施の形態 3 にかかる量子デバイス 50 が、ブリッジ型によって製造された例を示す。なお、実施の形態 3

にかかる量子デバイス 50 の製造方法については、図 27 を用いて説明したものと実質的に同様であるので、説明を省略する。

【0125】

図 26 に示した実施の形態 2 と同様に、第 1 の側 70A において、第 1 の導体 110A は、+Y 方向の端部に、X 軸方向に突出する突出部 114A（第 1 の突出部）を有する。また、第 1 の側 70A において、第 2 の導体 120A は、+Y 方向の端部に、X 軸方向に突出する突出部 124A を有する。突出部 114A は、第 1 の導体 110A に積層されている第 2 の導体 120A に覆われないように突出している。また、突出部 124A は、突出部 114A の近傍に設けられている。

【0126】

接続導体 154A は、突出部 114A、第 2 の導体 120A 及び導体層 130A に、直接、接続されている（超伝導コンタクト）。なお、図 26 に示すように、物理的に一体の接続導体 154A が、突出部 114A 及び突出部 124A の近傍全体を覆うようにして、成膜されていてもよい。言い換えると、接続導体 154A は、第 1 の導体 110A（突出部 114A）及び第 2 の導体 120A（突出部 124A）の両方を覆っている。このようにして、第 1 の側 70A において、第 1 の導体 110A と導体層 130A とが、直接、接続されている。さらに、第 1 の側 70A において、第 2 の導体 120A と導体層 130A とが、直接、接続されている。ここで、少なくとも突出部 124A は、突出部 114A の近傍に設けられているので、突出部 114A の近傍で、第 2 の導体 120A と導体層 130A とが接続されている。

【0127】

また、図 26 に示した実施の形態 2 と同様に、第 2 の側 70B において、第 1 の導体 110B は、-Y 方向の端部に、X 軸方向に突出する突出部 114B を有する。また、第 2 の側 70B において、第 2 の導体 120B は、-Y 方向の端部に、X 軸方向に突出する突出部 124B を有する。突出部 124B は、第 2 の導体 120B が積層している第 1 の導体 110B よりも X 軸方向に突出している。ここで、突出部 124B は、突出部 114B の近傍に設けられている。

【0128】

接続導体 154B は、第 1 の導体 110B（突出部 114B）、第 2 の導体 120B（突出部 124B）及び導体層 130B に、直接、接続されている（超伝導コンタクト）。なお、図 26 に示すように、物理的に一体の接続導体 154B が、突出部 114B 及び突出部 124B の近傍全体を覆うようにして、成膜されていてもよい。言い換えると、接続導体 154B は、第 1 の導体 110B 及び第 2 の導体 120B の両方を覆っている。このようにして、第 2 の側 70B において、第 2 の導体 120B と導体層 130B とが、直接、接続されている。さらに、第 2 の側 70B において、第 1 の導体 110B と導体層 130B とが、直接、接続されている。ここで、突出部 124B は、突出部 114B の近傍に設けられているので、突出部 114B の近傍で、第 2 の導体 120B と導体層 130B とが接続されている。

【0129】

実施の形態 2 にかかる量子デバイス 50 を斜め蒸着で製造する場合、同じレジストマスク 310 を使用して、第 1 の導体 110 と第 2 の導体 120 とを蒸着する。この場合、以下に説明するように、突出部 114A と突出部 124A との間隔（Y 軸方向の距離）を大きくすることは困難である。同様に、突出部 114B と突出部 124B との間隔（Y 軸方向の距離）を大きくすることは困難である。

【0130】

蒸着処理工程における、開口部 312 の位置と、対応する超伝導体（第 1 の導体 110 及び第 2 の導体 120）の位置との間の、Y 軸方向の位置ずれ量（シフト量）を考える。レジストマスク 310 の +Z 方向の端部（上面）と導体層 130A の表面との間の Z 軸方向の距離（レジストマスク 310 の高さ）を h とする。この場合、-Z 方向に見たときの、凹部 314A と突出部 114A と間の Y 軸方向のずれ量（シフト量に対応）は、 $h \times t$

10

20

30

40

50

$\tan \theta 1$ となる。したがって、凹部314A（突出部114A及び突出部124A）のY軸方向の幅をWとすると、突出部114Aと突出部124Aとの間隔Lは、レジストマスク310の厚さを考慮せずに考えると、概念的に、 $L = 2 * h * \tan \theta 1 - W$ と表され得る。L>0であれば、突出部114Aと突出部124Aとは、物理的に分離している。ここで、レジストマスク310の高さhは、概ね1 μ m以下となることが多い。したがって、斜め蒸着方法では、シフト量（ $h * \tan \theta 1$ ）を大きくすることは困難である。したがって、突出部114Aと突出部124Aとを分離しようとする、凹部314A（突出部114A及び突出部124A）の幅Wを、非常に小さく（概ね1 μ m以下）する必要がある。このことは、突出部114B及び突出部124Bでも同様である。したがって、実施の形態2のように、第1の側70Aで接続導体152Aを突出部114Aに接続させて突出部124Aに接続させないようにすることは、困難である。また、接続できたとしても、突出部114Aと接続導体152Aとの間の接触面積は非常に小さい。第2の側70Bでも同様である。

【0131】

これに対し、実施の形態3では、第1の側70Aで、第1の導体110A及び第2の導体120Aが、接続導体154Aを介して導体層130Aに接続されている。これにより、突出部114Aと突出部124Aとを物理的に分離する必要はない。つまり、実施の形態2よりも簡易な方法で、第1の導体110Aと導体層130Aとを超伝導コンタクトで接続することが可能となる。また、突出部114Aと接続導体154Aとの間の接触面積を、実施の形態2の場合よりも大きくすることができる。したがって、後述する実施の形態4と同様に、第1の導体110A（突出部114A）と接続導体154Aとの間の接触面積を大きくすることができるので、両者の間の電気抵抗を小さくすることができる。したがって、第1の導体110Aと導体層130Aとの間を、接続導体154Aを介してより確実に短絡することができる。したがって、酸化膜140Aに対応するスプリアス接合80Aに発生する電界をより抑制できるので、スプリアス接合80Aを無効化することができる可能性がさらに高くなる。第2の側70Bにおける第1の導体110B及び第2の導体120Bについても同様である。

【0132】

（実施の形態4）

次に、実施の形態4について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。実施の形態4では、突出部の形状及び数が、実施の形態3の場合と異なる。なお、第1の導体110と導体層130との接続状態、及び、第2の導体120と導体層130との接続状態については、実施の形態3と実質的に同様であるので、説明を省略する。

【0133】

図30は、実施の形態4にかかる量子デバイス50を示す図である。図30は、実施の形態4にかかる量子デバイス50の一部を示す平面図である。具体的には、図30は、実施の形態4にかかる量子デバイス50の第1の側70Aを示す。なお、第2の側70Bについても、図30と実質的に同様の構成としてもよい。また、実施の形態4においても、実施の形態2で導入したXYZ直交座標軸を導入する。

【0134】

第1の側70Aにおいて、第1の導体110Aは、X軸方向に突出する複数の突出部116A（第1の突出部）を有する。また、第1の側70Aにおいて、第2の導体120Aは、X軸方向に突出する複数の突出部126A（第2の突出部）を有する。複数の突出部116Aそれぞれは、第1の導体110Aに積層されている第2の導体120Aに覆われないように突出している。ここで、突出部116Aと突出部126Aとが、Y軸方向に交互に配置（成膜）されている。したがって、突出部126Aは、隣接する突出部116Aの近傍に設けられている。また、複数の突出部116Aは、互いに同じ側（図30では+X方向及び-X方向）に突出するように形成されている。同様に、複数の突出部126A

は、互いに同じ側（図30では+X方向及び-X方向）に突出するように形成されている。

【0135】

第1の導体110Aは、突出部116A1～116A5を有する。また、第2の導体120Aは、突出部126A1～126A5を有する。そして、突出部116A1の+Y方向に突出部126A1が配置されている。また、突出部126A1の+Y方向に突出部116A2が配置されている。また、突出部116A2の+Y方向に突出部126A2が配置されている。また、突出部126A2の+Y方向に突出部116A3が配置されている。また、突出部116A3の+Y方向に突出部126A3が配置されている。また、突出部126A3の+Y方向に突出部116A4が配置されている。また、突出部116A4の+Y方向に突出部126A4が配置されている。また、突出部126A4の+Y方向に突出部116A5が配置されている。また、突出部116A5の+Y方向に突出部126A5が配置されている。

10

【0136】

なお、後述するように、上述した他の実施の形態と同様に、突出部116A及び突出部126A（例えば突出部116A1及び突出部126A1）は斜め蒸着法により同じレジストマスクを用いて形成される。したがって、突出部116Aの形状と突出部126Aの形状とは互に対応している。なお、「形状が対応している」とは、一方の形状と他方の形状とが完全に一致することを意味するわけではない。例えば突出部126A1が突出部116A1に積層される場合、突出部126A1の形状は突出部116A1の形状と異なり得る。さらに、突出部116A及び突出部126Aが同じレジストマスクを用いて形成されるので、突出部116A及び突出部126Aの数は同じである。なお、突出部116A及び突出部126Aの数は、それぞれ5個である必要はない。レジストマスクの形状を図30及び後述する図31に対応するものから変更することによって、突出部116A及び突出部126Aの数を、適宜、変更することは可能である。また、複数の突出部116A（突出部116A1～116A5）それぞれの形状は、互いに異なってもよい。同様に、突出部126A（突出部126A1～126A5）それぞれの形状は、互いに異なってもよい。

20

【0137】

接続導体156Aは、突出部116A、第2の導体120A（突出部126A）及び導体層130Aに、直接、接続されている（超伝導コンタクト）。なお、図30に示すように、物理的に一体の接続導体156Aが、複数の突出部116A及び複数の突出部126Aそれぞれの少なくとも一部を覆うようにして、成膜されていてもよい。言い換えると、接続導体156Aは、第1の導体110A（突出部116A）及び第2の導体120A（突出部126A）の両方を覆っている。図30の例では、接続導体156Aは、突出部116A2から突出部126A5にかけて、形成されている。このようにして、第1の側70Aにおいて、第1の導体110Aと導体層130Aとが、直接、接続されている。さらに、第1の側70Aにおいて、第2の導体120Aと導体層130Aとが、直接、接続されている。ここで、少なくとも突出部126Aは、突出部116Aの近傍に設けられているので、突出部116Aの近傍で、第2の導体120Aと導体層130Aとが接続されている。

30

40

【0138】

なお、実施の形態4にかかる複数の突出部116A（及び複数の突出部126A）は、それらのX軸方向の長さが実施の形態2及び実施の形態3にかかる突出部114（及び突出部124）のX軸方向の長さよりも長くなるように、形成されている。さらに、実施の形態4にかかる突出部116A（及び突出部126A）は、複数設けられている。これにより、第1の導体110Aと接続導体156Aとの接触面積を大きくすることができる。突出部116A（及び突出部126A）の数を多くすることにより、第1の導体110Aと接続導体156Aとの接触面積をさらに大きくすることができる。

【0139】

なお、突出部116A及び突出部126Aの長さを長くする場合に、図18等にした

50

ようなレジストブリッジを有するレジストマスクを用いると、レジストブリッジの構造が不安定となるおそれがある。すなわち、超伝導体（第１の導体１１０及び第２の導体１２０）を形成する際に、レジストマスクの、図３０の矢印Ｄで示す箇所に対応する位置には、レジストブリッジが形成される。ここで、このレジストブリッジは、片持ち梁の構造をしている。そして、この片持ち梁は、固定端のサイズよりも梁の長さ（スパン）が極端に長く、したがって、強度上、不安定である。したがって、このレジストブリッジの形状を保持することは極めて困難である。したがって、図３１を用いて以下に説明する方法により、レジストブリッジを使用しないで実施の形態４にかかる超伝導体を形成することができる。

【０１４０】

図３１は、実施の形態４にかかる量子デバイス５０の製造方法を説明するための図である。実施の形態４にかかる量子デバイス５０は、実施の形態１と実質的に同様の方法（図１７～図２４）で製造される。しかしながら、実施の形態４で使用するレジストマスクの形状が、実施の形態１で使用するレジストマスクの形状と異なる。

【０１４１】

図３１は、図３０を－Ｘ方向に見た断面図に対応する。導体層１３０Ａに、レジストマスク３２０を形成する。ここで、レジストマスク３２０は、Ｙ軸方向に間隔を空けて配置されたレジストマスク部分３２１Ａ～３２１Ｆを有する。レジストマスク部分３２１Ａとレジストマスク部分３２１Ｂとの間には、開口部３２２Ａが設けられている。レジストマスク部分３２１Ｂとレジストマスク部分３２１Ｃとの間には、開口部３２２Ｂが設けられている。レジストマスク部分３２１Ｃとレジストマスク部分３２１Ｄとの間には、開口部３２２Ｃが設けられている。レジストマスク部分３２１Ｄとレジストマスク部分３２１Ｅとの間には、開口部３２２Ｄが設けられている。レジストマスク部分３２１Ｅとレジストマスク部分３２１Ｆとの間には、開口部３２２Ｅが設けられている。

【０１４２】

図１８と同様に、第１の蒸着処理工程において、矢印Ａ１の方向から、開口部３２２を介して、第１の導体１１０Ａの突出部１１６Ａが蒸着される。具体的には、開口部３２２Ａを介して、レジストマスク部分３２１Ａとレジストマスク部分３２１Ｂとの間に、第１の導体１１０Ａの突出部１１６Ａ１が蒸着される。開口部３２２Ｂを介して、レジストマスク部分３２１Ｂとレジストマスク部分３２１Ｃとの間に、第１の導体１１０Ａの突出部１１６Ａ２が蒸着される。開口部３２２Ｃを介して、レジストマスク部分３２１Ｃとレジストマスク部分３２１Ｄとの間に、第１の導体１１０Ａの突出部１１６Ａ３が蒸着される。開口部３２２Ｄを介して、レジストマスク部分３２１Ｄとレジストマスク部分３２１Ｅとの間に、第１の導体１１０Ａの突出部１１６Ａ４が蒸着される。開口部３２２Ｅを介して、レジストマスク部分３２１Ｅとレジストマスク部分３２１Ｆとの間に、第１の導体１１０Ａの突出部１１６Ａ５が蒸着される。

【０１４３】

そして、酸化工程（図１９）の後、図２０と同様に、第２の蒸着処理工程において、矢印Ａ２の方向から、開口部３２２を介して、第２の導体１２０Ａの突出部１２６Ａが蒸着される。具体的には、開口部３２２Ａを介して、レジストマスク部分３２１Ａとレジストマスク部分３２１Ｂとの間の、突出部１１６Ａ１の＋Ｙ方向の側に、第２の導体１２０Ａの突出部１２６Ａ１が蒸着される。開口部３２２Ｂを介して、レジストマスク部分３２１Ｂとレジストマスク部分３２１Ｃとの間の、突出部１１６Ａ２の＋Ｙ方向の側に、第２の導体１２０Ａの突出部１２６Ａ２が蒸着される。開口部３２２Ｃを介して、レジストマスク部分３２１Ｃとレジストマスク部分３２１Ｄとの間の、突出部１１６Ａ３の＋Ｙ方向の側に、第２の導体１２０Ａの突出部１２６Ａ３が蒸着される。開口部３２２Ｄを介して、レジストマスク部分３２１Ｄとレジストマスク部分３２１Ｅとの間の、突出部１１６Ａ４の＋Ｙ方向の側に、第２の導体１２０Ａの突出部１２６Ａ４が蒸着される。開口部３２２Ｅを介して、レジストマスク部分３２１Ｅとレジストマスク部分３２１Ｆとの間の、突出部１１６Ａ５の＋Ｙ方向の側に、第２の導体１２０Ａの突出部１２６Ａ５が蒸着される。

【0144】

開口部322のサイズ及びレジストマスク部分321の高さを調整することで、隣り合う突出部116Aと突出部126Aとを離間することができる。また、図30において、実際には、突出部126A1と突出部116A2との間には、レジストマスク部分321Bが形成されていた領域に対応する空間が設けられている。突出部126A2と突出部116A3との間、突出部126A3と突出部116A4との間、及び突出部126A4と突出部116A5との間についても同様である。

【0145】

実施の形態3（図29）のように、第1の側70Aにおいて、第1の導体110A（突出部114A）と接続導体154Aとの間の接触面積が小さすぎると、両者の間の電気抵抗が大きくなり、超伝導コンタクトとして機能しないおそれがある。この場合、第2の導体120Aと導体層130Aとの間の接触面積は大きいので、ジョセフソン接合100を構成する第1の導体110Aと、酸化膜140Aと、第2の導体120Aと、接続導体154Aと、導体層130Aとの間で、電流が流れる可能性がある。この場合、酸化膜140Aに対応するスプリアス接合80Aに発生する電界が大きくなり、スプリアス接合80Aを無効化できない可能性がある。

【0146】

これに対し、実施の形態4では、第1の側70Aにおいて、第1の導体110A（突出部116A）と接続導体156Aとの間の接触面積を大きくすることができるので、両者の間の電気抵抗を小さくすることができる。したがって、第1の導体110Aと導体層130Aとの間を、接続導体156Aを介してより確実に短絡することができる。したがって、酸化膜140Aに対応するスプリアス接合80Aに発生する電界を抑制できるので、スプリアス接合80Aを無効化することができる。したがって、実施の形態4にかかる量子デバイス50は、実施の形態3と比較して、性能の劣化を、より抑制することが可能となる。

【0147】

（実施の形態5）

次に、実施の形態5について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。

【0148】

図32は、実施の形態5にかかる量子デバイス52を示す図である。図32は実施の形態5にかかる量子デバイス52の平面図である。実施の形態5にかかる量子デバイス52は、実施の形態1にかかる量子デバイス50に対応する構成を、ブリッジレス型の製造方法（第2の比較例）によって製造したものである。

【0149】

実施の形態5にかかる量子デバイス52は、複数の第1の導体210（210A，210B）と、複数の第2の導体220（220A，220B）と、超伝導回路を構成する導体層230（230A，230B）とを有する。第1の導体210、第2の導体220及び導体層230は、基板60に積層されている。第1の導体210、第2の導体220及び導体層230の構成については、特記しない限り、第3の比較例と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

【0150】

ここで、実施の形態5では、量子デバイス52の説明の便宜のため、XYZ直交座標軸を導入している。基板60の導体層230及び超伝導体等が実装された面に沿った面をXY平面とし、この面に直交する方向をZ軸方向とする。また、XY平面に沿った方向をXY方向と称する。図32における左方を+Y方向とし、図32における下方を+X方向とする。なお、X方向及びY方向は、説明の便宜のためであり、実際の量子デバイス52を使用する際の配置される方向を示すものではない。また、XYZ直交座標軸の原点の位置は任意である。また、+Z方向は、図32の紙面奥から手前に向かう方向に対応する。ま

た、ジョセフソン接合 100 から第 1 の側 72 A を見た方向を +Y 方向とし、ジョセフソン接合 100 から第 2 の側 72 B を見た方向を +X 方向とする。これらのことは、以下に説明する他のブリッジレス型の実施の形態でも同様である。

【0151】

第 1 の導体 210 は、図 1 に示した第 1 の導体 2 に対応する。第 1 の導体 210 は、導体層 230 に積層されている。なお、導体層 230 は、図 1 に示した導体層 6 に対応する。また、第 2 の導体 220 は、図 1 に示した第 2 の導体 4 に対応する。第 2 の導体 220 は、第 1 の導体 210 に積層されている。第 1 の導体 210、第 2 の導体 220 及び導体層 230 は、超伝導材料で形成されている。例えば、第 1 の導体 210 及び第 2 の導体 220 は、アルミニウム (Al) で形成されている。また、例えば、導体層 230 (第 3 の導体) は、ニオブ (Nb) で形成されているとする。しかしながら、第 1 の導体 210 及び第 2 の導体 220 は、アルミニウム (Al) で形成されていなくてもよい。また、導体層 230 は、ニオブ (Nb) で形成されていなくてもよい。

10

【0152】

また、第 1 の導体 210 と第 2 の導体 220 との間には、酸化膜 (AlOx) が形成されている。この酸化膜は、図 1 に示した酸化膜 8 に対応する。また、第 1 の導体 210 (210A) の一部 (第 1 の導体部分 210Aa) と、第 2 の導体 220 (220B) の一部 (第 2 の導体部分 220Ba) と、酸化膜 (AlOx) とによって、ジョセフソン接合 200 が形成されている。ジョセフソン接合 200 は、図 1 に示したジョセフソン接合 100 に対応する。ジョセフソン接合 200 の構成については、第 3 の比較例及び他の実施の形態のものと実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

20

【0153】

また、第 1 の導体 210A のジョセフソン接合 200 の近傍には、Y 軸方向に延びるように細幅部 212A が形成されている。また、第 2 の導体 220B のジョセフソン接合 200 の近傍には、X 軸方向に延びるように細幅部 222B が形成されている。そして、細幅部 212A と細幅部 222B とが交差することによって、ジョセフソン接合 200 が形成されている。なお、第 1 の導体 210B には、細幅部は形成されていない。また、第 2 の導体 220A には、細幅部は形成されていない。

【0154】

第 3 の比較例と同様に、第 1 の側 72 A において、基板 60 及び導体層 230A に、第 1 の導体 210A が積層されている。また、第 1 の導体 210A 及び導体層 230A に、第 2 の導体 220A が積層されている。ここで、実施の形態 5 では、導体層 230A の、第 1 の導体 210A 及び第 2 の導体 220A と接している面には、酸化膜 (NbOx) が形成されている。また、第 1 の導体 210A の、基板 60 及び導体層 230A と接していない面には、酸化膜 (AlOx) が形成されている。つまり、第 1 の導体 210A の、第 2 の導体 220A 及び第 2 の導体 220B と接している面には、酸化膜が形成されている。

30

【0155】

一方、第 3 の比較例と同様に、第 2 の側 72 B において、基板 60 及び導体層 230B に、第 1 の導体 210B が積層されている。また、基板 60 及び第 1 の導体 210B に、第 2 の導体 220B が積層されている。ここで、第 1 の導体 210A の細幅部 212A の一部である第 1 の導体部分 210Aa に、酸化膜を介して、第 2 の導体 220B の細幅部 222B の一部である第 2 の導体部分 220Ba が積層されている。第 1 の導体部分 210Aa に酸化膜 (トンネルバリア層) を介して第 2 の導体部分 220Ba が積層されることにより、ジョセフソン接合 200 が形成されている。ここで、実施の形態 5 では、導体層 230B の、第 1 の導体 210B 及び第 2 の導体 220B と接している面には、酸化膜 (NbOx) が形成されている。また、第 1 の導体 210B の、基板 60 及び導体層 230B と接していない面には、酸化膜 (AlOx) が形成されている。つまり、第 1 の導体 210B の、第 2 の導体 220B と接している面には、酸化膜 (AlOx) が形成されている。

40

【0156】

50

また、実施の形態5にかかる量子デバイス52は、さらに、接続導体250（250A，250B）を有する。接続導体250は、超伝導材料で形成されている。接続導体250は、例えば、アルミニウム（Al）で形成されてもよい。接続導体250Aは、第1の側72Aにおいて、第1の導体210A及び導体層230Aに、直接、接続されている。これにより、接続導体250Aは、第1の側72Aにおいて、第1の導体210Aと導体層230Aとを接続する（超伝導コンタクト）。なお、実施の形態5では、接続導体250Aは、第1の側72Aにおいて、第2の導体220Aと接続されていない。

【0157】

また、接続導体250Bは、第2の側72Bにおいて、第2の導体220B及び導体層230Bに、直接、接続されている。これにより、接続導体250Bは、第2の側72Bにおいて、第2の導体220Bと導体層230Bとを接続する（超伝導コンタクト）。なお、実施の形態5では、接続導体250Bは、第2の側72Bにおいて、第1の導体210Bと接続されていない。

【0158】

ここで、第1の側72Aにおいて、第1の導体210Aは、+X方向に突出する突出部214A（第1の突出部）を有する。また、第1の側72Aにおいて、第2の導体220Aは、+X方向に突出する突出部224Aを有する。突出部214Aは、第1の導体210Aに積層されている第2の導体220Aに覆われないように突出している。ここで、突出部224Aは、突出部214Aの近傍に設けられている。なお、上述したように、第1の導体210A及び第2の導体220Aは、同じレジストマスクを基板60に対して固定した状態で用いることによって形成されるので、突出部214Aと突出部224Aとで、これらの形状及び数は互いに対応することとなる。

【0159】

接続導体250Aは、突出部214A及び導体層230Aに、直接、接続されている（超伝導コンタクト）。これにより、第1の側72Aにおいて、第1の導体210Aと導体層230Aとが、直接、接続されている。なお、実施の形態5では、接続導体250Aは、突出部224Aには接続されていない。

【0160】

また、第2の側72Bにおいて、第1の導体210Bは、+Y方向に突出する突出部214Bを有する。また、第2の側72Bにおいて、第2の導体220Bは、+Y方向に突出する突出部224Bを有する。突出部214Bは、第2の導体220Bが積層している第1の導体210Bよりも+Y方向に突出している。ここで、突出部224Bは、突出部214Bの近傍に設けられている。なお、上述したように、第1の導体210B及び第2の導体220Bは、同じレジストマスクを基板60に対して固定した状態で用いることによって形成されるので、突出部214Bと突出部224Bとで、これらの形状及び数は互いに対応することとなる。

【0161】

接続導体250Bは、突出部224B及び導体層230Bに、直接、接続されている（超伝導コンタクト）。これにより、第2の側72Bにおいて、第2の導体220Bと導体層230Bとが、直接、接続されている。なお、実施の形態5では、接続導体250Bは、突出部214Bには接続されていない。

【0162】

図33は、実施の形態5にかかる量子デバイス52の製造方法を説明するための図である。実施の形態5にかかる量子デバイス52は、第3の比較例と実質的に同様の方法（図13～図15）で製造される。しかしながら、実施の形態5では、実施の形態1と同様に、第1の導体210を成膜する前の酸化膜除去工程は実行されない。

【0163】

図33には、第1の導体210及び第2の導体220を形成するために使用されるレジストマスク500の開口部502（502A，502B）が、太い一点鎖線で示されている。実際には、図33において、開口部502と対向する箇所以外の領域が、レジストマ

10

20

30

40

50

スク 500 で覆われている。第 1 の側 72A に開口部 502A が形成され、第 2 の側 72B に開口部 502B が形成されている。

【0164】

また、開口部 502A は、Y 軸方向に延びるように形成され X 軸方向の幅が狭い細穴部 504A を有する。細穴部 504A は、図 13 の開口部分 31a に対応する。また、開口部 502B は、X 軸方向に延びるように形成され Y 軸方向の幅が狭い細穴部 504B を有する。細穴部 504B は、図 13 の開口部分 31b に対応する。細穴部 504A と細穴部 504B は、交差部分 504C で十字型に交差している。したがって、実施の形態 5 では、開口部 502A 及び開口部 502B は、一体に形成されている。なお、細穴部 504A の形状は細幅部 212A の XY 方向の形状に対応し、細穴部 504B の形状は細幅部 222B の XY 方向の形状に対応する。

10

【0165】

また、開口部 502A の導体層 230A と対向する箇所には、+X 方向に凹んだ凹部 506A が設けられている。凹部 506A の形状は、突出部 214A、224A の形状に対応する。また、開口部 502B の導体層 230B と対向する箇所には、+Y 方向に凹んだ凹部 506B が設けられている。凹部 506B の形状は、突出部 214B、224B の形状に対応する。

【0166】

実施の形態 5 では、実施の形態 1 等の場合と同様に、導体層成膜工程（図 17）の後、レジストマスク形成工程（図 18）において、レジストマスク 500 が基板 60 の上に形成される。そして、第 1 の蒸着処理工程（図 18）において、矢印 C1 で示すように、基板 60 の側から見て、-Z 方向に対して +Y 方向に角度 $\theta 2$ 傾いた方向から、第 1 の導体 210 が蒸着される。具体的には、開口部 502A を介して、第 1 の導体 210A が蒸着される。また、開口部 502B を介して、第 1 の導体 210B が蒸着される。このとき、凹部 506A に対応する形状の突出部 214A が形成される。また、凹部 506B に対応する形状の突出部 214B が形成される。

20

【0167】

なお、第 1 の蒸着処理工程においては、開口部 502 の +Y 方向の側の壁の近傍の底部（基板 60 等）には、超伝導材料は、その壁によって遮蔽されることによって、到達しない。したがって、第 1 の蒸着処理工程で成膜される第 1 の導体 210 は、平面視（-Z 方向を見た視点）において、開口部 502 の +Y 方向の側の壁から離れた箇所に成膜される。したがって、凹部 506B に対応する突出部 224B の位置には、第 1 の導体 210 が成膜されない。

30

【0168】

ここで、細穴部 504B については、Y 軸方向の幅が狭い。したがって、図 14 を用いて説明したように、第 1 の蒸着処理工程では、超伝導材料は、細穴部 504B に対応する底部（基板 60）には到達しない。したがって、第 1 の蒸着処理工程では、細穴部 504B に対応する導体の層は形成されない。一方、細穴部 504A については、Y 軸方向に延びている。したがって、第 1 の蒸着処理工程では、超伝導材料は、細穴部 504A に対応する底部（基板 60）に到達するので、細幅部 212A が形成される。

40

【0169】

そして、酸化工程（図 19）の後、第 2 の蒸着処理工程（図 20）において、矢印 C2 で示すように、基板 60 の側から見て、-Z 方向に対して +X 方向に角度 $\theta 2$ 傾いた方向から、第 2 の導体 220 が蒸着される。具体的には、開口部 502A を介して、第 2 の導体 220A が蒸着される。また、開口部 502B を介して、第 2 の導体 220B が蒸着される。このとき、凹部 506A に対応する形状の突出部 224A が形成される。また、凹部 506B に対応する形状の突出部 224B が形成される。

【0170】

なお、第 2 の蒸着処理工程においては、開口部 502 の +X 方向の側の壁の近傍の底部（基板 60 等）には、超伝導材料は、その壁によって遮蔽されることによって、到達しな

50

い。したがって、第2の蒸着処理工程で成膜される第2の導体220は、平面視において、開口部502の+X方向の側の壁から離れた箇所に成膜される。したがって、突出部214Aの位置には第2の導体220が成膜されないため、突出部214Aは、第2の導体220に覆われない。

【0171】

ここで、細穴部504Aについては、X軸方向の幅が狭い。したがって、図14を用いて説明したように、第2の蒸着処理工程では、超伝導材料は、細穴部504Aに対応する底部（基板60）には到達しない。したがって、第2の蒸着処理工程では、細穴部504Aに対応する導体の層は形成されない。一方、細穴部504Bについては、X軸方向に延びている。したがって、第2の蒸着処理工程では、超伝導材料は、細穴部504Bに対応する底部（基板60）に到達するので、細幅部222Bが形成される。

10

【0172】

次に、リフトオフ工程（図21）においてレジストマスク500が除去された後、接続導体250を形成するためのレジストマスクが形成される（図22）。なお、接続導体250を形成するためのレジストマスクは、接続導体250が形成されている位置とZ軸方向に対向する位置に、開口部が設けられている。そして、酸化膜除去工程（図22）の後、接続導体蒸着工程（図23）において、接続導体250が形成される。これにより、第1の側72Aで、突出部214A（第1の導体210A）と導体層230Aとが、接続導体250Aによって接続される。また、第2の側72Bで、突出部224B（第2の導体220B）と導体層230Bとが、接続導体250Bによって接続される。

20

【0173】

実施の形態5にかかる量子デバイス52は、上記のように構成されているので、実施の形態2にかかる量子デバイス50と実質的に同様の効果を奏する。つまり、第1の側72Aで第1の導体210A（突出部214A）と導体層230Aとが接続され、第2の側72Bで第2の導体220Bと導体層230Bとが接続されている。つまり、実施の形態5では、ジョセフソン接合200を構成する第1の導体210Aが、接続導体250Aを介して、導体層230Aと接続されている。また、ジョセフソン接合200を構成する第2の導体220Bが、接続導体250Bを介して、導体層230Bと接続されている。そして、実施の形態5では、ジョセフソン接合200を構成しない第2の導体220Aは、接続導体250Aと接続されていない。同様に、ジョセフソン接合200を構成しない第1の導体210Bは、接続導体250Bと接続されていない。したがって、実施の形態5では、実施の形態2の場合と同様に、スプリアス接合82を無効化できる可能性が高い。したがって、実施の形態5にかかる量子デバイス52は、コヒーレンス（性能）の劣化をさらに抑制することが可能となる。

30

【0174】

なお、実施の形態5では、斜め蒸着方法でジョセフソン接合200を形成することから、シフト量が小さいことに起因する、実施の形態2にかかる問題点と実質的に同様の問題点が懸念される。つまり、実施の形態2で上述したシフト量が小さいことから、第2の蒸着処理工程で形成される突出部224Aと、凹部506Aの+X方向の壁部との間の、X軸方向の距離は、非常に短い。したがって、第2の導体220に覆われていない突出部214AのXY方向の面積は非常に狭い。したがって、突出部224A（第2の導体220）に接触させないようにしつつ接続導体250Aを突出部214Aに接続させることは、困難である。また、接続できたとしても、突出部214Aと接続導体250Aとの間の接触面積は非常に小さい。

40

【0175】

（実施の形態6）

次に、実施の形態6について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。実施の形態6では、突出部の構成が、実施の形態5と異なる。

50

【0176】

図34は、実施の形態6にかかる量子デバイス52を示す図である。図34は実施の形態6にかかる量子デバイス52の平面図である。実施の形態6にかかる量子デバイス52は、複数の第1の導体210（210A，210B）と、複数の第2の導体220（220A，220B）と、超伝導回路を構成する導体層230（230A，230B）とを有する。第1の導体210、第2の導体220及び導体層230は、基板60に積層されている。第1の導体210、第2の導体220及び導体層230の構成については、特記しない限り、実施の形態5と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

【0177】

また、実施の形態6にかかる量子デバイス52は、さらに、接続導体256（256A，256B）を有する。接続導体256は、超伝導材料で形成されている。接続導体256は、例えば、アルミニウム（Al）で形成されてもよい。接続導体256Aは、第1の側72Aにおいて、第1の導体210A及び導体層230Aに、直接、接続されている。これにより、接続導体256Aは、第1の側72Aにおいて、第1の導体210Aと導体層230Aとを接続する（超伝導コンタクト）。なお、実施の形態6では、接続導体256Aは、第1の側72Aにおいて、第2の導体220Aと接続されていない。

10

【0178】

また、接続導体256Bは、第2の側72Bにおいて、第2の導体220B及び導体層230Bに、直接、接続されている。これにより、接続導体256Bは、第2の側72Bにおいて、第2の導体220Bと導体層230Bとを接続する（超伝導コンタクト）。なお、実施の形態6では、接続導体256Bは、第2の側72Bにおいて、第1の導体210Bと接続されていない。

20

【0179】

ここで、第1の側72Aにおいて、第1の導体210Aは、+Y方向に突出する複数の突出部216A（第1の突出部）を有する。複数の突出部216Aそれぞれは、第1の導体210Aに積層されている第2の導体220Aに覆われずに突出している。図34には、4個の突出部216A1～216A4が示されている。しかしながら、突出部216Aの数は、4個に限定されず、1つ以上であればよい。突出部216A1の-X方向に突出部216A2が配置されている。突出部216A2の-X方向に突出部216A3が配置されている。突出部216A3の-X方向に突出部216A4が配置されている。なお、実施の形態4と異なり、突出部216Aの近傍には、第2の導体220Aにかかる突出部は形成されていない。ここで、複数の突出部216Aそれぞれは、細幅部212Aと同様に、Y軸方向に延びるように形成されている。つまり、突出部216Aは、X軸方向の幅が狭くなるように形成されている。

30

【0180】

接続導体256Aは、突出部216A及び導体層230Aに、直接、接続されている（超伝導コンタクト）。これにより、第1の側72Aにおいて、第1の導体210Aと導体層230Aとが、直接、接続されている。ここで、図34に示すように、物理的に一体の接続導体256Aが、複数の突出部216A1～216A4それぞれの少なくとも一部を覆うようにして、成膜されていてもよい。なお、突出部216Aの近傍には第2の導体220Aにかかる突出部は形成されていないので、接続導体256Aは、第2の導体220Aとは接触していない。

40

【0181】

なお、実施の形態6にかかる複数の突出部216Aは、これらの+Y方向の長さが、実施の形態5にかかる突出部214Aの第2の導体220に覆われていない箇所の+X方向の長さよりも長くなるように、形成されている。さらに、実施の形態6にかかる突出部216Aは、複数設けられている。これにより、実施の形態5と比較して、第1の導体210Aと接続導体256Aとの接触面積を大きくすることができる。

【0182】

また、第2の側72Bにおいて、第2の導体220Bは、+X方向に突出する複数の突

50

出部 2 2 6 B (第 2 の突出部) を有する。複数の突出部 2 2 6 B それぞれは、第 2 の導体 2 2 0 B が積層されている第 1 の導体 2 1 0 B よりも突出している。図 3 4 には、4 個の突出部 2 2 6 B 1 ~ 2 2 6 B 4 が示されている。しかしながら、突出部 2 2 6 B の数は、4 個に限定されず、1 つ以上であればよい。突出部 2 2 6 B 1 の - Y 方向に突出部 2 2 6 B 2 が配置されている。突出部 2 2 6 B 2 の - Y 方向に突出部 2 2 6 B 3 が配置されている。突出部 2 2 6 B 3 の - Y 方向に突出部 2 2 6 B 4 が配置されている。なお、実施の形態 4 と異なり、突出部 2 2 6 B の近傍には、第 1 の導体 2 1 0 B にかかる突出部は形成されていない。ここで、複数の突出部 2 2 6 B それぞれは、細幅部 2 2 2 B と同様に、X 軸方向に延びるように形成されている。つまり、突出部 2 2 6 B は、Y 軸方向の幅が狭くなるように形成されている。

10

【0183】

接続導体 2 5 6 B は、突出部 2 2 6 B 及び導体層 2 3 0 B に、直接、接続されている (超伝導コンタクト)。これにより、第 2 の側 7 2 B において、第 2 の導体 2 2 0 B と導体層 2 3 0 B とが、直接、接続されている。ここで、図 3 4 に示すように、物理的に一体の接続導体 2 5 6 B が、複数の突出部 2 2 6 B 1 ~ 2 2 6 B 4 それぞれの少なくとも一部を覆うようにして、成膜されていてもよい。なお、突出部 2 2 6 B の近傍には第 1 の導体 2 1 0 B にかかる突出部は形成されていないので、接続導体 2 5 6 B は、第 1 の導体 2 1 0 B とは接触していない。

【0184】

なお、実施の形態 6 にかかる複数の突出部 2 2 6 B は、これらの + X 方向の長さが、実施の形態 5 にかかる突出部 2 2 4 B の第 1 の導体 2 1 0 よりも突出した箇所の + Y 方向の長さよりも長くなるように、形成されている。さらに、実施の形態 6 にかかる突出部 2 2 6 B は、複数設けられている。これにより、第 2 の導体 2 2 0 B と接続導体 2 5 6 B との接触面積を大きくすることができる。

20

【0185】

図 3 5 は、実施の形態 6 にかかる量子デバイス 5 2 の製造方法を説明するための図である。実施の形態 6 にかかる量子デバイス 5 2 は、実施の形態 5 と実質的に同様の方法で製造される。

【0186】

図 3 5 には、第 1 の導体 2 1 0 及び第 2 の導体 2 2 0 を形成するために使用されるレジストマスク 5 1 0 の開口部 5 1 2 (5 1 2 A, 5 1 2 B) が、太い一点鎖線で示されている。実際には、図 3 5 において、開口部 5 1 2 と対向する箇所以外の領域が、レジストマスク 5 1 0 で覆われている。第 1 の側 7 2 A に開口部 5 1 2 A が形成され、第 2 の側 7 2 B に開口部 5 1 2 B が形成されている。

30

【0187】

また、開口部 5 1 2 A は、Y 軸方向に延びるように形成され X 軸方向の幅が狭い細穴部 5 0 4 A を有する。また、開口部 5 1 2 B は、X 軸方向に延びるように形成され Y 軸方向の幅が狭い細穴部 5 0 4 B を有する。細穴部 5 0 4 A と細穴部 5 0 4 B は、交差部分 5 0 4 C で十字型に交差している。なお、細穴部 5 0 4 A の形状は細幅部 2 1 2 A の X Y 方向の形状に対応し、細穴部 5 0 4 B の形状は細幅部 2 2 2 B の X Y 方向の形状に対応する。

40

【0188】

また、開口部 5 1 2 A の導体層 2 3 0 A と対向する箇所には、+ Y 方向に凹んだ複数の凹部 5 1 6 A が設けられている。凹部 5 1 6 A の形状は、突出部 2 1 6 A の形状に対応する。したがって、凹部 5 1 6 A は、Y 軸方向に延びるように形成され、X 軸方向の幅が狭くなるように形成されている。開口部 5 1 2 A は、それぞれ + Y 方向に凹んだ凹部 5 1 6 A 1 ~ 5 1 6 A 4 を有する。凹部 5 1 6 A 1 の - X 方向に凹部 5 1 6 A 2 が配置されている。凹部 5 1 6 A 2 の - X 方向に凹部 5 1 6 A 3 が配置されている。凹部 5 1 6 A 3 の - X 方向に凹部 5 1 6 A 4 が配置されている。そして、凹部 5 1 6 A 1 ~ 5 1 6 A 4 の形状は、それぞれ、突出部 2 1 6 A 1 ~ 2 1 6 A 4 の形状に対応する。

【0189】

50

また、開口部 5 1 2 B の導体層 2 3 0 B と対向する箇所には、+ X 方向に凹んだ凹部 5 1 6 B が設けられている。凹部 5 1 6 B の形状は、突出部 2 2 6 B の形状に対応する。したがって、凹部 5 1 6 B は、X 軸方向に延びるように形成され、Y 軸方向の幅が狭くなるように形成されている。開口部 5 1 2 B は、それぞれ + X 方向に凹んだ凹部 5 1 6 B 1 ~ 5 1 6 B 4 を有する。凹部 5 1 6 B 1 の - Y 方向に凹部 5 1 6 B 2 が配置されている。凹部 5 1 6 B 2 の - Y 方向に凹部 5 1 6 B 3 が配置されている。凹部 5 1 6 B 3 の - Y 方向に凹部 5 1 6 B 4 が配置されている。そして、凹部 5 1 6 B 1 ~ 5 1 6 B 4 の形状は、それぞれ、突出部 2 2 6 B 1 ~ 2 2 6 B 4 の形状に対応する。

【0190】

実施の形態 6 では、実施の形態 5 の場合と同様に、導体層成膜工程（図 1 7）の後、レジストマスク形成工程（図 1 8）において、レジストマスク 5 1 0 が基板 6 0 の上に形成される。そして、第 1 の蒸着処理工程（図 1 8）において、矢印 C 1 で示すように、基板 6 0 の側から見て、- Z 方向に対して + Y 方向に角度 $\theta 2$ 傾いた方向から、第 1 の導体 2 1 0 が蒸着される。具体的には、開口部 5 1 2 A を介して、第 1 の導体 2 1 0 A が蒸着される。また、開口部 5 1 2 B を介して、第 1 の導体 2 1 0 B が蒸着される。

【0191】

なお、実施の形態 5 において上述したように、細穴部 5 0 4 B については、Y 軸方向の幅が狭いので、第 1 の蒸着処理工程では、細穴部 5 0 4 B に対応する導体の層は形成されない。一方、細穴部 5 0 4 A については、Y 軸方向に延びているので、第 1 の蒸着処理工程では、細幅部 2 1 2 A が形成される。

【0192】

また、細穴部 5 0 4 B と同様に、凹部 5 1 6 B については、Y 軸方向の幅が狭いので、第 1 の蒸着処理工程では、超伝導材料は、凹部 5 1 6 B に対応する底部（導体層 2 3 0 B）には到達しない。したがって、第 1 の蒸着処理工程では、凹部 5 1 6 B に対応する導体の層（突出部）は形成されない。一方、細穴部 5 0 4 A と同様に、凹部 5 1 6 A については、Y 軸方向に延びているので、第 1 の蒸着処理工程では、超伝導材料は、凹部 5 1 6 A に対応する底部（導体層 2 3 0 A）に到達する。したがって、第 1 の蒸着処理工程では、凹部 5 1 6 A に対応する突出部 2 1 6 A が形成される。

【0193】

そして、酸化工程（図 1 9）の後、第 2 の蒸着処理工程（図 2 0）において、矢印 C 2 で示すように、基板 6 0 の側から見て、- Z 方向に対して + X 方向に角度 $\theta 2$ 傾いた方向から、第 2 の導体 2 2 0 が蒸着される。具体的には、開口部 5 1 2 A を介して、第 2 の導体 2 2 0 A が蒸着される。また、開口部 5 1 2 B を介して、第 2 の導体 2 2 0 B が蒸着される。

【0194】

なお、実施の形態 5 において上述したように、細穴部 5 0 4 A については、X 軸方向の幅が狭いので、第 2 の蒸着処理工程では、細穴部 5 0 4 A に対応する導体の層は形成されない。一方、細穴部 5 0 4 B については、X 軸方向に延びているので、第 2 の蒸着処理工程では、細幅部 2 2 2 B が形成される。

【0195】

また、細穴部 5 0 4 A と同様に、凹部 5 1 6 A については、X 軸方向の幅が狭いので、第 2 の蒸着処理工程では、超伝導材料は、凹部 5 1 6 A に対応する底部（導体層 2 3 0 A）には到達しない。したがって、第 2 の蒸着処理工程では、凹部 5 1 6 A に対応する導体の層（突出部）は形成されない。一方、細穴部 5 0 4 B と同様に、凹部 5 1 6 B については、X 軸方向に延びているので、第 2 の蒸着処理工程では、超伝導材料は、凹部 5 1 6 B に対応する底部（導体層 2 3 0 B）に到達する。したがって、第 2 の蒸着処理工程では、凹部 5 1 6 B に対応する突出部 2 2 6 B が形成される。

【0196】

次に、リフトオフ工程（図 2 1）においてレジストマスク 5 1 0 が除去された後、接続導体 2 5 6 を形成するためのレジストマスクが形成される（図 2 2）。なお、接続導体 2

10

20

30

40

50

56を形成するためのレジストマスクは、接続導体256が形成されている位置とZ軸方向に対向する位置に、開口部が設けられている。そして、酸化膜除去工程（図22）の後、接続導体蒸着工程（図23）において、接続導体256が形成される。これにより、第1の側72Aで、突出部216A（第1の導体210A）と導体層230Aとが、接続導体256Aによって接続される。また、第2の側72Bで、突出部226B（第2の導体220B）と導体層230Bとが、接続導体256Bによって接続される。

【0197】

実施の形態6にかかる量子デバイス52は、上記のように構成されているので、実施の形態2にかかる量子デバイス50と実質的に同様の効果を奏する。つまり、第1の側72Aで第1の導体210A（突出部216A）と導体層230Aとが接続され、第2の側72Bで第2の導体220B（突出部226B）と導体層230Bとが接続されている。つまり、実施の形態6では、ジョセフソン接合200を構成する第1の導体210Aが、接続導体256Aを介して、導体層230Aと接続されている。また、ジョセフソン接合200を構成する第2の導体220Bが、接続導体256Bを介して、導体層230Bと接続されている。そして、実施の形態6では、ジョセフソン接合200を構成しない第2の導体220Aは、接続導体252Aと接続されていない。同様に、ジョセフソン接合200を構成しない第1の導体210Bは、接続導体252Bと接続されていない。したがって、実施の形態6では、スプリアス接合82を無効化できる可能性が高い。したがって、実施の形態6にかかる量子デバイス52は、コヒーレンス（性能）の劣化をさらに抑制することが可能となる。

【0198】

また、実施の形態6では、第1の側72Aにおいて第1の導体210Aに突出部216Aが形成されている。そして、突出部216Aは、第1の導体210Aに積層された第2の導体220Aよりも突出している。ここで、突出部216Aの突出量は、実施の形態5にかかる突出部214Aの突出量よりも大きい。そして、突出部216Aの近傍には、第2の導体220Aに関する突出部は形成されていない。したがって、第1の側72Aにおいて、接続導体256Aは、より確実に、第2の導体220Aに接触しないで、第1の導体210A（突出部216A）に接触することができる。さらに、実施の形態6では、突出部216Aの突出量が大きいので、実施の形態5の場合と比較して、突出部216Aと接続導体256Aとの間の接触面積を大きくすることができる。したがって、第1の導体210Aと導体層230Aとの間を、接続導体256Aを介してより確実に短絡することができる。したがって、スプリアス接合82Aに発生する電界をより抑制できるので、スプリアス接合82Aを無効化することができる可能性がさらに高くなる。

【0199】

また、実施の形態6では、第2の側72Bにおいて第2の導体220Bに突出部226Bが形成されている。そして、突出部226Bは、第2の導体220Bが積層している第1の導体210Bよりも突出している。ここで、突出部226Bの突出量は、実施の形態5にかかる突出部224Bの突出量よりも大きい。そして、突出部226Bの近傍には、第1の導体210Bに関する突出部は形成されていない。したがって、第2の側72Bにおいて、接続導体256Bは、より確実に、第1の導体210Bに接触しないで、第2の導体220B（突出部226B）に接触することができる。さらに、実施の形態6では、突出部226Bの突出量が大きいので、実施の形態5の場合と比較して、突出部226Bと接続導体256Aとの間の接触面積を大きくすることができる。したがって、第2の導体220Bと導体層230Bとの間を、接続導体256Bを介してより確実に短絡することができる。したがって、スプリアス接合82Bに発生する電界をより抑制できるので、スプリアス接合82Bを無効化することができる可能性がさらに高くなる。

【0200】

さらに、実施の形態6では、突出部216Aが複数設けられているので、突出部216Aと接続導体256Aとの間の接触面積をさらに大きくすることができる。したがって、第1の導体210Aと導体層230Aとの間を、接続導体256Aを介してさらに確実に

短絡することができる。したがって、スプリアス接合 8 2 A に発生する電界をさらに抑制できるので、スプリアス接合 8 2 A を無効化することができる可能性がさらに高くなる。突出部 2 2 6 B についても同様である。

【0201】

また、実施の形態 6 では、第 1 の側 7 2 A において、第 2 の導体 2 2 0 A が導体層 2 3 0 A と接続しないで第 1 の導体 2 1 0 A が導体層 2 3 0 A と接続している。一方、第 2 の側 7 2 B において、第 1 の導体 2 1 0 B が導体層 2 3 0 B と接続しないで第 2 の導体 2 2 0 B が導体層 2 3 0 B と接続している。このように、第 1 の側 7 2 A と第 2 の側 7 2 B とで、導体層 2 3 0 と接続する超伝導体を、より確実に、異なるものとすることができる。これにより、スプリアス接合 8 2 A を無効化することができる可能性がさらに高くなる。

10

【0202】

(実施の形態 7)

次に、実施の形態 7 について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。

【0203】

図 3 6 は、実施の形態 7 にかかる量子デバイス 5 0 を示す図である。図 3 6 は、実施の形態 7 にかかる量子デバイス 5 0 の断面図である。実施の形態 7 にかかる量子デバイス 5 0 は、上述したブリッジ型の製造方法によって製造される。実施の形態 7 にかかる量子デバイス 5 0 は、第 1 の比較例及び実施の形態 1 と同様に、基板 6 0 と、複数の第 1 の導体 1 1 0 (1 1 0 A, 1 1 0 B) と、複数の第 2 の導体 1 2 0 (1 2 0 A, 1 2 0 B) と、導体層 1 3 0 (1 3 0 A, 1 3 0 B) とを有する。第 1 の導体 1 1 0、第 2 の導体 1 2 0 及び導体層 1 3 0 の構成については、特記しない限り、第 1 の比較例と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。また、実施の形態 7 においても、実施の形態 2 で導入した X Y Z 直交座標軸を導入する。

20

【0204】

第 1 の導体 1 1 0 は、導体層 1 3 0 に積層されている。第 2 の導体 1 2 0 は、第 1 の導体 1 1 0 に積層されている。第 1 の導体 1 1 0、第 2 の導体 1 2 0 及び導体層 1 3 0 は、超伝導材料で形成されている。例えば、第 1 の導体 1 1 0 及び第 2 の導体 1 2 0 は、アルミニウム (A l) で形成されているとする。また、例えば、導体層 1 3 0 (第 3 の導体) は、ニオブ (N b) で形成されているとする。しかしながら、第 1 の導体 1 1 0 及び第 2 の導体 1 2 0 は、アルミニウム (A l) で形成されていなくてもよい。また、導体層 1 3 0 は、ニオブ (N b) で形成されていなくてもよい。

30

【0205】

また、第 1 の導体 1 1 0 と第 2 の導体 1 2 0 との間には、酸化膜 1 4 0 (1 4 0 A, 1 4 0 B) が形成されている。また、第 1 の導体 1 1 0 (1 1 0 A) の一部 (第 1 の導体部分 1 1 0 A a) と、第 2 の導体 1 2 0 (1 2 0 B) の一部 (第 2 の導体部分 1 2 0 B a) と、酸化膜 1 4 0 (1 4 0 A) とによって、ジョセフソン接合 1 0 0 が形成されている。ジョセフソン接合 1 0 0 の構成については、第 1 の比較例及び実施の形態 1 のものと実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

40

【0206】

第 1 の側 7 0 A において、基板 6 0 及び導体層 1 3 0 A に、第 1 の導体 1 1 0 A が積層されている。また、第 1 の導体 1 1 0 A 及び導体層 1 3 0 A に、第 2 の導体 1 2 0 A が積層されている。また、導体層 1 3 0 A の、基板 6 0 及び第 1 の導体 1 1 0 A と接していない面には、酸化膜 1 3 2 A (N b O x) が形成されている。また、第 1 の導体 1 1 0 A の、基板 6 0 及び導体層 1 3 0 A と接していない面には、酸化膜 1 4 0 A (A l O x) が形成されている。つまり、第 1 の導体 1 1 0 A の、第 2 の導体 1 2 0 A 及び第 2 の導体 1 2 0 B と接している面には、酸化膜 1 4 0 A が形成されている。上述したように、第 1 の導体 1 1 0 A と第 2 の導体 1 2 0 A との間の酸化膜 1 4 0 A は、スプリアス接合 8 0 A として機能する。

50

【0207】

第2の側70Bにおいて、基板60及び導体層130Bに、第1の導体110Bが積層されている。また、基板60及び第1の導体110Bに、第2の導体120Bが積層されている。また、導体層130Bの、基板60及び第1の導体110Bと接していない面には、酸化膜132B (NbO_x) が形成されている。また、第1の導体110Bの、基板60及び導体層130Bと接していない面には、酸化膜140B (AlO_x) が形成されている。つまり、第1の導体110Bの、第2の導体120Bと接している面には、酸化膜140Bが形成されている。上述したように、酸化膜140Bは、スプリアス接合80Bとして機能する。

【0208】

ここで、実施の形態7では、実施の形態1等と異なり、導体層130Aの第1の導体110Aと接している面130Aaの少なくとも一部には、酸化膜132Aが形成されていない。同様に、導体層130Bの第1の導体110Bと接している面130Baの少なくとも一部には、酸化膜132Bが形成されていない。なお、第1の比較例と同様に、第1の導体110の蒸着処理の前に導体層130に対して酸化膜除去工程を実行することによって、導体層130Aの面130Aa及び導体層130Bの面130Baの酸化膜132を除去することができる。これにより、導体層130と超伝導体(第1の導体110)との接続(超伝導コンタクト)を形成する。つまり、第1の導体110と導体層130とが、第1の導体110が導体層130に積層された面において、直接、接続されている。具体的には、第1の側70Aにおいて、導体層130Aと第1の導体110Aとの接続(超伝導コンタクト)を形成する。同様に、第2の側70Bにおいて、導体層130Bと第1の導体110Bとの接続(超伝導コンタクト)を形成する。なお、第1の比較例の説明で述べたように、第1の導体110の蒸着処理の前に酸化膜除去工程が実行されるので、基板60の表面にダメージ層62が形成され得る。

【0209】

また、実施の形態7にかかる量子デバイス50は、第2の側70Bにおいて、接続導体158Bを有する。接続導体158Bは、アルミニウム(Al)等の超伝導材料で形成されている。接続導体158Bは、少なくとも、導体層130B及び第2の導体120Bに、直接、接続されている。例えば、接続導体158Bは、導体層130B及び第2の導体120Bに積層されている。ここで、接続導体158Bと、導体層130B及び第2の導体120Bとの間には、酸化膜等の誘電体は形成されていない。したがって、第2の導体120Bは、接続導体158Bを介して、導体層130Bと酸化膜(誘電体)を介さずに接続されている。なお、上述したように、実施の形態7では、第1の側70Aにおいて導体層130Aと第1の導体110Aとの接続(超伝導コンタクト)が形成されているので、第1の側70Aには、接続導体が形成されていなくてもよい。

【0210】

図37～図45は、実施の形態7にかかる量子デバイス50の製造方法を示す工程図である。まず、図37に示すように、第1の比較例(図3)と同様にして、基板60を用意し、基板60に導体層130を成膜する(導体層成膜工程)。導体層130の成膜は、例えば、スパッタリングによって行われ得る。あるいは、導体層130の成膜は、蒸着又はCVDによって行われてもよい。そして、導体層130への回路パターンの形成は、例えば、光学的リソグラフィおよび反応性イオンエッチングの組み合わせによって行われ得る。なお、光学的リソグラフィに代えて電子線描画法等を用いてもよい。また、反応性イオンエッチングに代えてウェットエッチング等を用いてもよい。なお、導体層130の表面(基板60に接していない面)には、酸化膜132(ニオブ酸化物層)が形成されている。

【0211】

次に、図38に示すように、第1の比較例(図4)と同様にして、レジストマスク300(レジストパターン)が形成される(レジストマスク形成工程)。このとき、基板60等は真空環境下に置かれる。つまり、基板60等は、内部が真空状態となった容器内に密閉された状態で配置されている。また、レジストマスク300が除去されるまで、レジス

10

20

30

40

50

トマスク 300 は、基板 60 に対して移動されず、固定されている。レジストマスク 300 のレジストパターンによって、開口部 302 (302A, 302B) が形成される。なお、以後、レジストマスク 300 を除去するまで、開口部 302 と対向する箇所以外の基板 60 及び導体層 130 は、レジストマスク 300 で覆われている。また、レジストマスク 300 は、レジストブリッジ 300b を有する。これによって、開口部 302 が 2 つの開口部 302A, 302B に分離されている。この状態で、導体層 130 の表面の酸化膜 132 を除去する (酸化膜除去工程)。酸化膜 132 の除去は、例えば、矢印 B で示すように開口部 302 を介してイオンビームを照射する、イオンミリング等によって行われる。

【0212】

次に、図 39 に示すように、第 1 の比較例 (図 5) と同様にして、矢印 A1 に示す方向からの斜め蒸着により、第 1 の導体 110 が蒸着される (第 1 の蒸着処理工程)。斜め蒸着の方向は、基板 60 の側から見て、基板 60 の表面に対する垂直方向に対して例えば 20 度程度傾いた方向である。つまり、垂直方向に対する角度を $\theta 1$ とすると、 $\theta 1 = 20$ 度程度の方向から、超伝導材料を蒸着する。第 1 の蒸着処理工程では、基板 60 の側から見て、基板 60 の表面に対する垂直方向から第 1 の側 70A の方に角度 $\theta 1$ 傾いた方向から、超伝導材料を射出する。

【0213】

このようにして、開口部 302A を介して、第 1 の導体 110A が蒸着される。また、開口部 302B を介して、第 1 の導体 110B が蒸着される。また、レジストマスク 300 には、第 1 の導体 110 とともに蒸着された超伝導材料 110X (Al) が積層される。また、レジストブリッジ 300b によって、第 1 の導体 110A と第 1 の導体 110B とを分離する隙間 G1 が形成される。ここで、酸化膜除去工程 (図 38) が実行されたので、第 1 の導体 110A と導体層 130A との間には、酸化膜 132A が形成されていない。また、第 1 の導体 110B と導体層 130B との間には、酸化膜 132B が形成されていない。

【0214】

次に、図 40 に示すように、第 1 の比較例 (図 6) と同様にして、第 1 の導体 110 の表面を酸化する (酸化工程)。これにより、第 1 の導体 110A の表面に酸化膜 140A (AlOx) が形成される。また、第 1 の導体 110B の表面に酸化膜 140B (AlOx) が形成される。

【0215】

次に、図 41 に示すように、第 1 の比較例 (図 7) と同様にして、矢印 A2 に示す方向からの斜め蒸着により、第 2 の導体 120 が蒸着される (第 2 の蒸着処理工程)。このとき、開口部 302A を介して、第 2 の導体 120A が蒸着される。また、開口部 302B を介して、第 2 の導体 120B が蒸着される。また、レジストマスク 300 には、第 2 の導体 120 とともに蒸着された超伝導材料 120X (Al) が積層される。また、レジストブリッジ 300b によって、第 1 の導体 110A 上に、第 2 の導体 120A と第 2 の導体 120B とを分離する隙間 G2 が形成される。また、第 1 の導体 110A と第 2 の導体 120B とが重なる箇所に、ジョセフソン接合 100 が形成される。

【0216】

次に、図 42 に示すように、レジストマスク 300 が除去される (リフトオフ工程)。これにより、レジストマスク 300 と、レジストマスク 300 に積層された余分な超伝導材料 110X, 120X が除去される。このとき、真空状態 (密閉状態) が大気環境に開放される。つまり、基板 60 を配置する装置は、真空状態 (密閉状態) から大気環境下に置かれる。なお、大気環境下であるので、第 2 の導体 120 の表面に、酸化膜 142 が形成される。つまり、第 2 の導体 120A の表面に酸化膜 142A が形成され、第 2 の導体 120B の表面に酸化膜 142B が形成される。

【0217】

次に、図 43 に示すように、接続導体 158B を形成するためのレジストマスク 410 (レジストパターン) が形成される (接続導体用レジストマスク形成工程)。このとき、

基板 60 等は真空環境下に置かれる。つまり、基板 60 等は、内部が真空状態となった容器内に密閉されて配置されている。レジストマスク 410 のレジストパターンによって、第 2 の側 70 B に開口部 412 B が形成される。なお、実施の形態 1 等と異なり、第 1 の側 70 A には接続導体は形成されない。第 1 の側 70 A にはレジストマスク 410 の開口部は設けられていない。

【0218】

この状態で、第 1 の導体 110、第 2 の導体 120 及び導体層 130 の、レジストマスク 410 に覆われずに露出している箇所に形成されている酸化膜を除去する（酸化膜除去工程）。これにより、レジストマスク 410 に覆われていない、導体層 130 の表面の酸化膜 132、第 2 の導体 120 の表面の酸化膜 142 及び第 1 の導体 110 の表面の酸化膜 140 が除去される。酸化膜 132、140、142 の除去は、例えば、矢印 B で示すように開口部 402 を介してイオンビームを照射する、イオンミリング等によって行われる。

10

【0219】

次に、図 44 に示すように、開口部 412 B を介して接続導体 158 B が蒸着される（接続導体蒸着工程）。なお、接続導体 158 B の蒸着処理は、斜め蒸着である必要はない。これにより、開口部 412 B を介して、接続導体 158 B が成膜される。また、レジストマスク 410 には、接続導体 158 B とともに蒸着された超伝導材料 150 X (A1) が積層される。

20

【0220】

開口部 412 B に対向する箇所に、接続導体 158 B が成膜されることによって、第 2 の導体 120 B が、接続導体 158 B と、直接、接続される（超伝導コンタクト）。また、導体層 130 B が、接続導体 158 B と、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第 2 の導体 120 B と導体層 130 B とが、導体（接続導体 158 B）を介して接続される。なお、第 1 の導体 110 B が、接続導体 158 B と、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第 1 の導体 110 B と導体層 130 B とが、導体（接続導体 158 B）を介して接続される。

【0221】

次に、図 45 に示すように、レジストマスク 410 が除去される（リフトオフ工程）。これにより、レジストマスク 410 と、レジストマスク 410 に積層された余分な超伝導材料 150 X が除去される。このようにして、図 36 に示した、実施の形態 7 にかかる量子デバイス 50 が製造される。なお、図 38～図 41 の工程は、同一の密閉状態で実行される。つまり、図 38～図 41 の工程において、密閉状態は大気環境に開放されない。また、図 43～図 44 の工程は、同一の密閉状態で実行される。つまり、図 43～図 44 の工程において、密閉状態は大気環境に開放されない。

30

【0222】

図 46 は、実施の形態 7 にかかる量子デバイス 50 の回路構成を模式的に示す図である。第 1 の側 70 A では、ジョセフソン接合 100 から導体層 130 A との間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合 80 A を経由する第 1 の経路以外にも、第 2 の経路が存在する。すなわち、第 1 の経路は、ジョセフソン接合 100 が、第 1 の導体 110 A とスプリアス接合 80 A（酸化膜 140 A）と第 2 の導体 120 A と酸化膜 132 A とを介して、導体層 130 A と接続される経路である。なお、酸化膜 132 A は、酸化工程（図 40）によって形成されたものである。一方、第 2 の経路は、ジョセフソン接合 100 が第 1 の導体 110 A と接続され、第 1 の導体 110 A と導体層 130 A とが、直接接続される経路である。つまり、酸化膜除去工程（図 38）によって第 1 の導体 110 A と導体層 130 A との間に酸化膜が形成されていないので、スプリアス接合 80 A の両端の導体（第 1 の導体 110 A 及び導体層 130 A）が短絡している。したがって、スプリアス接合 80 A は電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合 80 A に発生する電界は大きくならないので、スプリアス接合 80 A はロスの発生に寄与しないこととなる。

40

50

【0223】

また、第2の側70Bでは、ジョセフソン接合100から導体層130Bとの間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合80Bを経由する第1の経路以外にも、第2の経路が存在する。すなわち、第1の経路は、ジョセフソン接合100が、第2の導体120Bとスプリアス接合80B（酸化膜140B）と第1の導体110Bとを介して、導体層130Bと接続される経路である。一方、第2の経路は、ジョセフソン接合100が第2の導体120Bと接続され、第2の導体120Bと導体層130Bとが接続導体158Bを介して接続される経路である。つまり、スプリアス接合80Bの両端の導体（第2の導体120B及び導体層130B）が接続導体158Bによって短絡しており、スプリアス接合80Bは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合80Bに発生する電界は大きくなりないので、スプリアス接合80Bはロスの発生に寄与しないこととなる。

10

【0224】

したがって、実施の形態7では、スプリアス接合80A、80Bを無効化することができる。これにより、実施の形態7にかかる量子デバイス50は、性能の劣化を抑制することが可能となる。また、実施の形態7では、実施の形態1等において第1の導体110及び第2の導体120に形成されている突出部が、形成されていない。したがって、実施の形態7にかかる量子デバイス50は、突出部を設けなくても、性能の劣化を抑制することが可能となる。つまり、実施の形態7にかかる量子デバイス50は、実施の形態1等と比較して、超伝導体の形状を簡素化することができる。

20

【0225】

なお、実施の形態7では、導体層130に第1の導体110を形成する前に、導体層130の表面の酸化膜132を除去する必要がある。したがって、実施の形態7にかかる量子デバイス50は、実施の形態1等と比較して、多くの工程によって製造されることとなる。逆に言うと、実施の形態1等については、実施の形態7と比較して少ない工程で、スプリアス接合80を無効化した量子デバイス52を製造することができる。

【0226】

図47は、実施の形態7にかかる量子デバイス50の変形例を示す図である。図47は、実施の形態7にかかる量子デバイス50の変形例を示す平面図である。図47に示す量子デバイス50の第1の導体110及び第2の導体120は、実施の形態2のものと実質的に同様の形状を有する。そして、第2の側70Bにおいて、接続導体158Bは、突出部124Bに接するようにして、第2の導体120Bに積層されている。ここで、接続導体158Bは、第1の導体110Bに形成された突出部114Bに接しないようにして、第2の導体120Bに積層されている。また、接続導体158Bは、第2の導体120Bについて、突出部124B以外の箇所にも接している。したがって、接続導体158Bが第1の導体110Bに接することなく、第2の導体120Bと接続導体158Bとの間の接触面積を大きくすることができる。

30

【0227】

図48は、実施の形態7にかかる酸化膜除去工程（図38）の変形例を説明するための図である。上述したように、図38で示したように、第1の導体110の蒸着処理の前に酸化膜除去工程が実行されると、基板60の表面にダメージ層62が形成されるおそれがある。そこで、図48に示す方法によって、基板60の表面にダメージ層62が形成されることを抑制する。

40

【0228】

レジストマスク300が形成された状態で、酸化膜132を除去するためのイオンビームを、矢印Dで示すように、基板60の側から見て、-Z方向から+X方向に傾いた方向（第3の方向）から照射する。イオンビームを照射する方向は、例えば、基板60の側から見て、-Z方向から+X方向に45度程度傾いた方向であってもよい。この場合、平面視で、イオンビームは、矢印Dで示すように、-X方向に照射される。一方、斜め蒸着の方向は、平面視で、-Y方向（第1の方向）、及び、+Y方向（第2の方向）である。し

50

たがって、イオンビームを照射する方向は、斜め蒸着の方向と異なる。言い換えると、酸化膜除去工程において、イオンビームを、斜め蒸着の方向とは異なる方向から照射する。

【0229】

これにより、第1の側70Aにおいて、イオンビームは、照射領域ArAに照射される。また、第2の側70Bにおいて、イオンビームは、照射領域ArBに照射される。ここで、開口部302Aは、ジョセフソン接合100を構成する第1の導体部分110Aaを形成するための細穴部304Aを有する。細穴部304Aは、Y軸方向に延びるように形成されている。そして、細穴部304Aは、少なくとも基板60と対向する箇所において、X軸方向の幅が狭くなるように形成されている。同様に、開口部302Bは、ジョセフソン接合100を構成する第2の導体部分120Baを形成するための細穴部304Bを有する。細穴部304Bは、Y軸方向に延びるように形成されている。そして、細穴部304Bは、少なくとも基板60と対向する箇所において、X軸方向の幅が狭くなるように形成されている。

【0230】

細穴部304がこのように形成されていることによって、イオンビームを照射する際に、細穴部304においては、イオンビームは、レジストマスク300の+X方向の側の壁によって遮蔽されるので、基板60に照射されない。したがって、基板60にダメージ層62が形成されることを抑制できる。なお、開口部302の導体層130と対向する箇所については、X軸方向の幅は、イオンビームの少なくとも一部が導体層130に照射される程度に大きい。したがって、第1の導体110が積層される箇所の少なくとも一部の導体層130の表面の酸化膜132を除去できる。

【0231】

図48にかかる方法では、イオンビームを導体層130の表面に照射し、イオンビームを導体層130の表面以外の領域には照射しないようにして、酸化膜132を除去する。このような方法によって、基板60の表面にダメージ層62が形成されることを抑制しつつ、実施の形態7にかかる効果を奏することが可能となる。

【0232】

(実施の形態8)

次に、実施の形態8について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。

【0233】

図49は、実施の形態8にかかる量子デバイス52を示す図である。図49は、実施の形態8にかかる量子デバイス52の平面図である。実施の形態8にかかる量子デバイス52は、実施の形態7にかかる量子デバイス50に対応する構成を、ブリッジレス型の製造方法によって製造したものである。

【0234】

実施の形態8にかかる量子デバイス52は、複数の第1の導体210(210A, 210B)と、複数の第2の導体220(220A, 220B)と、超伝導回路を構成する導体層230(230A, 230B)とを有する。第1の導体210、第2の導体220及び導体層230は、基板60に積層されている。第1の導体210、第2の導体220及び導体層230の構成については、特記しない限り、第3の比較例と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。また、実施の形態8においても、実施の形態5で導入したXYZ直交座標軸を導入する。

【0235】

第1の導体210は、導体層230に積層されている。第2の導体220は、第1の導体210に積層されている。第1の導体210、第2の導体220及び導体層230は、超伝導材料で形成されている。例えば、第1の導体210及び第2の導体220は、アルミニウム(Al)で形成されている。また、例えば、導体層230(第3の導体)は、ニオブ(Nb)で形成されている。

【0236】

また、第1の導体210と第2の導体220との間には、酸化膜（ AlO_x ）が形成されている。また、第1の導体210（210A）の一部（第1の導体部分210Aa）と、第2の導体220（220B）の一部（第2の導体部分220Ba）と、酸化膜とによって、ジョセフソン接合200が形成されている。ジョセフソン接合200の構成については、第3の比較例及び実施の形態5のものと実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。また、細幅部212A及び細幅部222Bについても、第3の比較例及び実施の形態5のものと実質的に同様であるので、説明を省略する。

【0237】

また、第3の比較例等と同様に、第1の側72Aにおいて、基板60及び導体層230Aに、第1の導体210Aが積層されている。また、第1の導体210A及び導体層230Aに、第2の導体220Aが積層されている。また、第1の導体210Aの、第2の導体220A及び第2の導体220Bと接している面には、酸化膜が形成されている。また、第3の比較例と同様に、導体層230Aの、第1の導体210Aが積層されている面には、酸化膜が形成されていない。したがって、導体層230Aと第1の導体210Aとが、直接、接続されている。つまり、第1の導体210Aと導体層230Aとが、第1の導体210Aが導体層230Aに積層された面において、直接、接続されている。

【0238】

一方、第3の比較例と同様に、第2の側72Bにおいて、基板60及び導体層230Bに、第1の導体210Bが積層されている。また、基板60及び第1の導体210Bに、第2の導体220Bが積層されている。また、第1の導体210Bの、第2の導体220Bと接している面には、酸化膜（ AlO_x ）が形成されている。また、第3の比較例と同様に、導体層230Bの、第1の導体210Bが積層されている面には、酸化膜が形成されていない。したがって、導体層230Bと第1の導体210Bとが、直接、接続されている。

【0239】

また、実施の形態8にかかる量子デバイス52は、第2の側72Bにおいて、接続導体258Bを有する。接続導体258Bは、超伝導材料で形成されている。接続導体258Bは、例えば、アルミニウム（Al）で形成されてもよい。接続導体258Bは、第2の側72Bにおいて、第2の導体220B及び導体層230Bに、直接、接続されている。これにより、接続導体258Bは、第2の側72Bにおいて、第2の導体220Bと導体層230Bとを接続する（超伝導コンタクト）。なお、実施の形態8では、接続導体258Bは、第2の側72Bにおいて、第1の導体210Bと接続されていてもよい。なお、実施の形態8では、第1の側72Aにおいて導体層230Aと第1の導体210Aとの接続（超伝導コンタクト）が形成されているので、第1の側72Aには、接続導体が形成されていない。

【0240】

なお、実施の形態8にかかる量子デバイス52の回路構成は、図46に示したものと実質的に同様である。つまり、第1の側72Aでは、ジョセフソン接合200から導体層230Aとの間の電気的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合82Aを経由する第1の経路以外にも、第2の経路が存在する。すなわち、第1の経路は、ジョセフソン接合200が、第1の導体210Aとスプリアス接合82Aと第2の導体220Aと導体層230Aに形成された酸化膜とを介して、導体層230Aと接続される経路である。一方、第2の経路は、ジョセフソン接合200が第1の導体210Aと接続され、第1の導体210Aと導体層230Aとが直接接続される経路である。つまり、スプリアス接合82Aの両端の導体が短絡しており、スプリアス接合82Aは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合82Aに発生する電界は大きくならないので、スプリアス接合82Aはロスの発生に寄与しないこととなる。

【0241】

また、第2の側72Bでは、ジョセフソン接合200から導体層230Bとの間の電気

10

20

30

40

50

的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合 8 2 B を経由する第 1 の経路以外にも、第 2 の経路が存在する。すなわち、第 1 の経路は、ジョセフソン接合 2 0 0 が、第 2 の導体 2 2 0 B とスプリアス接合 8 2 B と第 1 の導体 2 1 0 B とを介して、導体層 2 3 0 B と接続される経路である。一方、第 2 の経路は、ジョセフソン接合 2 0 0 が第 2 の導体 2 2 0 B と接続され、第 2 の導体 2 2 0 B と導体層 2 3 0 B とが接続導体 2 5 8 B を介して接続される経路である。つまり、スプリアス接合 8 2 B の両端の導体（第 2 の導体 2 2 0 B 及び導体層 2 3 0 B）が接続導体 2 5 8 B によって短絡しており、スプリアス接合 8 2 B は電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合 8 2 B に発生する電界は大きくなりないので、スプリアス接合 8 2 B はロスの発生に寄与しないこととなる。

【0 2 4 2】

したがって、実施の形態 8 では、スプリアス接合 8 2 A , 8 2 B を無効化することができる。これにより、実施の形態 8 にかかる量子デバイス 5 2 は、性能の劣化を抑制することが可能となる。また、実施の形態 8 では、実施の形態 5 等において第 1 の導体 2 1 0 及び第 2 の導体 2 2 0 に形成されている突出部が、形成されていなくてもよい。したがって、実施の形態 8 にかかる量子デバイス 5 2 は、突出部を設けなくても、性能の劣化を抑制することが可能となる。つまり、実施の形態 8 にかかる量子デバイス 5 2 は、実施の形態 5 等と比較して、超伝導体の形状を簡素化することができる。

【0 2 4 3】

なお、実施の形態 8 では、導体層 2 3 0 に第 1 の導体 2 1 0 を形成する前に、導体層 2 3 0 の表面の酸化膜を除去する必要がある。したがって、実施の形態 8 にかかる量子デバイス 5 2 は、実施の形態 5 等と比較して、多くの工程によって製造されることとなる。逆に言うと、実施の形態 5 については、実施の形態 8 と比較して少ない工程で、スプリアス接合 8 2 を無効化した量子デバイス 5 2 を製造することができる。

【0 2 4 4】

（実施の形態 9）

次に、実施の形態 9 について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。

【0 2 4 5】

図 5 0 は、実施の形態 9 にかかる量子デバイス 5 0 を示す図である。図 5 0 は、実施の形態 9 にかかる量子デバイス 5 0 の断面図である。実施の形態 9 にかかる量子デバイス 5 0 は、上述したブリッジ型の製造方法によって製造される。実施の形態 9 にかかる量子デバイス 5 0 は、実施の形態 1 と同様に、基板 6 0 と、複数の第 1 の導体 1 1 0（1 1 0 A , 1 1 0 B）と、複数の第 2 の導体 1 2 0（1 2 0 A , 1 2 0 B）と、導体層 1 3 0（1 3 0 A , 1 3 0 B）とを有する。第 1 の導体 1 1 0、第 2 の導体 1 2 0 及び導体層 1 3 0 の構成については、特記しない限り、実施の形態 1 と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

【0 2 4 6】

第 1 の導体 1 1 0 は、導体層 1 3 0 に積層されている。第 2 の導体 1 2 0 は、第 1 の導体 1 1 0 に積層されている。第 1 の導体 1 1 0、第 2 の導体 1 2 0 及び導体層 1 3 0 は、超伝導材料で形成されている。例えば、第 1 の導体 1 1 0 及び第 2 の導体 1 2 0 は、アルミニウム（Al）で形成されている。また、例えば、導体層 1 3 0（第 3 の導体）は、ニオブ（Nb）で形成されている。

【0 2 4 7】

また、実施の形態 9 にかかる量子デバイス 5 0 は、接続導体 1 6 0（1 6 0 A , 1 6 0 B）を有する。接続導体 1 6 0 は、例えば、アルミニウム（Al）等の超伝導材料で形成されている。また、第 1 の導体 1 1 0 と第 2 の導体 1 2 0 との間には、酸化膜 1 4 0（1 4 0 A , 1 4 0 B）が形成されている。また、第 1 の導体 1 1 0（1 1 0 A）の一部（第 1 の導体部分 1 1 0 A a）と、第 2 の導体 1 2 0（1 2 0 B）の一部（第 2 の導体部分 1 2 0 B a）と、酸化膜 1 4 0（1 4 0 A）とによって、ジョセフソン接合 1 0 0 が形成さ

10

20

30

40

50

れている。ジョセフソン接合 100 の構成については、第 1 の比較例及び実施の形態 1 のものと実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。

【0248】

第 1 の側 70 A において、基板 60 及び導体層 130 A に、第 1 の導体 110 A が積層されている。また、第 1 の導体 110 A 及び導体層 130 A に、第 2 の導体 120 A が積層されている。また、導体層 130 A 及び第 2 の導体 120 A に、接続導体 160 A が積層されている。ここで、第 1 の側 70 A において、接続導体 160 A と第 2 の導体 120 A と第 1 の導体 110 A とが積層された箇所には、接続穴 162 A が形成されている。つまり、接続穴 162 A は、第 1 の側 70 A における、第 1 の導体 110 A が第 2 の導体 120 A に覆われている箇所に形成されている。そして、接続穴 162 A は、第 2 の導体 120 A 及び酸化膜 140 A を貫通し、第 1 の導体 110 A に達している。そして、接続導体 160 A が、接続穴 162 A の底部まで積層されている。これにより、接続導体 160 A が、接続穴 162 A において、第 1 の導体 110 A に、直接、接続されている。

10

【0249】

これにより、第 1 の導体 110 A と、導体層 130 A とが、接続導体 160 A を介して接続される（超伝導コンタクト）。これにより、スプリアス接合 80 A の両端の導体（第 1 の導体 110 A 及び導体層 130 A）が短絡する。したがって、スプリアス接合 80 A は電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合 80 A に発生する電界は大きくなりないので、スプリアス接合 80 A はロスの発生に寄与しないこととなる。

20

【0250】

一方、第 2 の側 70 B において、基板 60 及び導体層 130 B に、第 1 の導体 110 B が積層されている。また、基板 60 及び第 1 の導体 110 B に、第 2 の導体 120 B が積層されている。また、導体層 130 B、第 1 の導体 110 B 及び第 2 の導体 120 B に、接続導体 160 B が積層されている。これにより、第 2 の導体 120 B が接続導体 160 B と接続される。したがって、第 2 の導体 120 B は、導体層 130 B 及び接続導体 160 B を介して、接続されている。つまり、スプリアス接合 80 B の両端の導体（第 2 の導体 120 B 及び導体層 130 B）が接続導体 160 B によって短絡するので、スプリアス接合 80 B は電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合 80 B に発生する電界は大きくなりないので、スプリアス接合 80 B はロスの発生に寄与しないこととなる。

30

【0251】

図 51 は、実施の形態 9 にかかる量子デバイス 50 の回路構成を模式的に示す図である。第 1 の側 70 A では、ジョセフソン接合 100 から導体層 130 A との間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合 80 A を経由する第 1 の経路以外にも、第 2 の経路及び第 3 の経路が存在する。すなわち、第 1 の経路は、ジョセフソン接合 100 が、第 1 の導体 110 A とスプリアス接合 80 A（酸化膜 140 A）と第 2 の導体 120 A と酸化膜 132 A とを介して、導体層 130 A と接続される経路である。また、第 2 の経路は、ジョセフソン接合 100 が第 1 の導体 110 A と接続され、第 1 の導体 110 A と導体層 130 A とが、酸化膜 132 A を介して接続される経路である。一方、第 3 の経路は、ジョセフソン接合 100 が第 1 の導体 110 A と接続され、第 1 の導体 110 A と導体層 130 A とが、接続穴 162 A に形成された接続導体 160 A を介して接続される経路である。つまり、スプリアス接合 80 A の両端の導体（第 1 の導体 110 A 及び導体層 130 A）が接続導体 160 A によって短絡している。したがって、スプリアス接合 80 A は電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合 80 A に発生する電界は大きくなりないので、スプリアス接合 80 A はロスの発生に寄与しないこととなる。

40

【0252】

また、第 2 の側 70 B では、ジョセフソン接合 100 から導体層 130 B との間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合 80 B を経由する第 1 の経路以外にも、第 2 の経路が存在する。すなわち、第 1 の経路は、ジョセフソン接合 100 が、第 2 の導体 120 B とスプリアス接合 80 B（酸化膜 140 B）と第 1 の導体 110 B と酸化膜 132 B とを介して、導体層 130 B と接続される経路である。一方、第 2 の経

50

路は、ジョセフソン接合 100 が第 2 の導体 120 B と接続され、第 2 の導体 120 B と導体層 130 B とが接続導体 160 B を介して接続される経路である。つまり、スプリアス接合 80 B の両端の導体（第 2 の導体 120 B 及び導体層 130 B）が接続導体 160 B によって短絡しており、スプリアス接合 80 B は電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合 80 B に発生する電界は大きくならないので、スプリアス接合 80 B はロスの発生に寄与しないこととなる。

【0253】

図 5 2 ～ 図 6 0 は、実施の形態 9 にかかる量子デバイス 50 の製造方法を示す工程図である。まず、図 5 2 に示すように、実施の形態 1（図 1 7）と同様にして、基板 60 を用意し、基板 60 に導体層 130 を成膜する（導体層成膜工程）。なお、導体層 130 の表面（基板 60 に接していない面）には、酸化膜 132（NbO_x）が形成されている。

10

【0254】

次に、図 5 3 に示すように、実施の形態 1（図 1 8）と同様にして、レジストマスク 300（レジストパターン）が基板 60 の上に形成される（レジストマスク形成工程）。実施の形態 9 では、この段階では、実施の形態 1 と同様に、酸化膜除去工程が実行されない。この状態で、矢印 A 1 に示す方向からの斜め蒸着により、第 1 の導体 110 が蒸着される（第 1 の蒸着処理工程）。このとき、開口部 302 A を介して、第 1 の導体 110 A が蒸着される。また、開口部 302 B を介して、第 1 の導体 110 B が蒸着される。また、レジストマスク 300 には、第 1 の導体 110 とともに蒸着された超伝導材料 110 X（Al）が積層される。また、酸化膜除去工程が実行されなかったため、第 1 の導体 110 A と導体層 130 A との間には、酸化膜 132 A が形成されている。また、第 1 の導体 110 B と導体層 130 B との間には、酸化膜 132 B が形成されている。

20

【0255】

次に、図 5 4 に示すように、実施の形態 1（図 1 9）と同様にして、第 1 の導体 110 の表面を酸化する（酸化工程）。これにより、第 1 の導体 110 A の表面に酸化膜 140 A（AlO_x）が形成される。また、第 1 の導体 110 B の表面に酸化膜 140 B（AlO_x）が形成される。

【0256】

次に、図 5 5 に示すように、実施の形態 1（図 2 0）と同様にして、矢印 A 2 に示す方向からの斜め蒸着により、第 2 の導体 120 が蒸着される（第 2 の蒸着処理工程）。このとき、開口部 302 A を介して、第 2 の導体 120 A が蒸着される。また、開口部 302 B を介して、第 2 の導体 120 B が蒸着される。また、レジストマスク 300 には、第 2 の導体 120 とともに蒸着された超伝導材料 120 X（Al）が積層される。また、第 1 の導体 110 A と第 2 の導体 120 B とが重なる箇所に、ジョセフソン接合 100 が形成される。

30

【0257】

次に、図 5 6 に示すように、実施の形態 1（図 2 1）と同様にして、レジストマスク 300 が除去される（リフトオフ工程）。これにより、レジストマスク 300 と、レジストマスク 300 に積層された余分な超伝導材料 110 X、120 X が除去される。このとき、真空状態（密閉状態）が大気環境に開放される。つまり、基板 60 を配置する装置は、真空状態（密閉状態）から大気環境下に置かれる。なお、大気環境下であるので、第 2 の導体 120 の表面に、酸化膜 142 が形成される。つまり、第 2 の導体 120 A の表面に酸化膜 142 A が形成され、第 2 の導体 120 B の表面に酸化膜 142 B が形成される。

40

【0258】

次に、図 5 7 に示すように、接続穴 162 A が形成される（接続穴形成工程）。具体的には、接続穴 162 A を形成するためのレジストマスク 420（レジストパターン）が形成される（接続穴用レジストマスク形成工程）。レジストマスク 420 において、第 1 の側 70 A の、第 1 の導体 110 A に第 2 の導体 120 A が積層された箇所に、開口部 422 A が設けられている。そして、エッチング等の表面加工処理によって、開口部 422 A に対応する箇所の、第 2 の導体 120 A 及び酸化膜 140 A を除去する。その際に、第 1

50

の導体 110A の一部を除去してもよい。これにより、開口部 422A に対応する箇所に、接続穴 162A が形成され、第 1 の導体 110A が露出する。そして、レジストマスク 420 が除去される。

【0259】

次に、図 58 に示すように、接続導体 160 を形成するためのレジストマスク 430（レジストパターン）が形成される（接続導体用レジストマスク形成工程）。このとき、基板 60 等は真空環境下に置かれる。つまり、基板 60 等は、内部が真空状態となった容器内に密閉されて配置されている。レジストマスク 430 のレジストパターンによって、開口部 432（432A、432B）が形成される。レジストマスク 430 において、第 1 の側 70A に開口部 432A が設けられ、第 2 の側 70B に開口部 432B が設けられる。なお、以後、レジストマスク 430 を除去するまで、開口部 432 と対向する箇所以外の基板 60 等は、レジストマスク 430 で覆われている。なお、後述するように、開口部 432 に対向する箇所に、接続導体 160 が形成される。

【0260】

ここで、開口部 432A に対応する箇所には、接続穴 162A が設けられている。言い換えると、開口部 432A を介して接続穴 162A が露出するように、レジストマスク 430 が形成される。さらに言い換えると、接続穴 162A を覆わないように、レジストマスク 430 が形成される。

【0261】

実施の形態 1 と同様に、この状態で、第 1 の導体 110、第 2 の導体 120 及び導体層 130 の、レジストマスク 430 に覆われずに露出している箇所に形成されている酸化膜を除去する（酸化膜除去工程）。これにより、レジストマスク 430 に覆われていない、導体層 130 の表面の酸化膜 132、第 2 の導体 120 の表面の酸化膜 142 及び第 1 の導体 110 の表面の酸化膜 140 が除去される。酸化膜 132、140、142 の除去は、例えば、矢印 B で示すように開口部 402 を介してイオンビームを照射する、イオンミリング等によって行われる。なお、酸化膜 132、140、142 を除去するのは、接続導体 160 によって導体層 130 と超伝導体（第 1 の導体 110 及び第 2 の導体 120）との接続（超伝導コンタクト）を形成するためである。

【0262】

次に、図 59 に示すように、実施の形態 1（図 23）と同様にして、開口部 432 を介して接続導体 160 が蒸着される（接続導体蒸着工程）。なお、接続導体 160 の蒸着処理は、斜め蒸着である必要はない。これにより、開口部 432A を介して、接続導体 160A が成膜される。このとき、接続穴 162A に、接続導体 160A が成膜される。また、接続穴 162A を介して第 1 の導体 110A に、接続導体 160A が成膜される。また、開口部 432B を介して、接続導体 160B が成膜される。また、レジストマスク 430 には、接続導体 160 とともに蒸着された超伝導材料 160X（Al）が積層される。

【0263】

開口部 432A に対向する箇所に、接続導体 160A が成膜されることによって、接続穴 162A を介して、第 1 の導体 110A が、接続導体 160A と、直接、接続される（超伝導コンタクト）。また、導体層 130A が、接続導体 160A と、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第 1 の導体 110A と導体層 130A とが、導体（接続導体 160A）を介して接続される。なお、第 2 の導体 120A が、接続導体 160A と、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第 2 の導体 120A と導体層 130A とが、導体（接続導体 160A）を介して接続される。

【0264】

また、開口部 432B に対向する箇所に、接続導体 160B が成膜されることによって、第 2 の導体 120B が、接続導体 160B と、直接、接続される（超伝導コンタクト）。また、導体層 130B が、接続導体 160B と、直接、接続される（超伝導コンタクト）。したがって、第 2 の導体 120B と導体層 130B とが、導体（接続導体 160B）を介して接続される。なお、第 1 の導体 110B が、接続導体 160B と、直接、接続さ

れる（超伝導コンタクト）。したがって、第１の導体１１０Ｂと導体層１３０Ｂとが、導体（接続導体１６０Ｂ）を介して接続される。

【０２６５】

次に、図６０に示すように、実施の形態１（図２４）と同様にして、レジストマスク４３０が除去される（リフトオフ工程）。これにより、レジストマスク４３０と、レジストマスク４３０に積層された余分な超伝導材料１６０Ｘが除去される。このようにして、図５０に示した、実施の形態９にかかる量子デバイス５０が製造される。なお、図５３～図５５の工程は、同一の密閉状態で実行される。つまり、図５３～図５５の工程において、密閉状態は大気環境に開放されない。また、図５８～図５９の工程は、同一の密閉状態で実行される。つまり、図５８～図５９の工程において、密閉状態は大気環境に開放されない。

10

【０２６６】

上述したように、実施の形態９では、スプリアス接合８０Ａ，８０Ｂを無効化することができる。これにより、実施の形態９にかかる量子デバイス５０は、性能の劣化を抑制することが可能となる。また、実施の形態９では、実施の形態１等において第１の導体１１０及び第２の導体１２０に形成されている突出部が、形成されていない。したがって、実施の形態９にかかる量子デバイス５０は、突出部を設けなくても、性能の劣化を抑制することが可能となる。つまり、実施の形態９にかかる量子デバイス５０は、実施の形態１等と比較して、超伝導体の形状を簡素化することができる。

【０２６７】

なお、実施の形態９では、接続導体１６０を成膜する前に、接続穴１６２Ａを形成する必要がある。したがって、実施の形態９にかかる量子デバイス５０は、実施の形態１等と比較して、多くの工程によって製造されることとなる。逆に言うと、実施の形態１等については、実施の形態９と比較して少ない工程で、スプリアス接合８０を無効化した量子デバイス５０を製造することができる。

20

【０２６８】

（実施の形態１０）

次に、実施の形態１０について説明する。説明の明確化のため、以下の記載及び図面は、適宜、省略、及び簡略化がなされている。また、各図面において、同一の要素には同一の符号が付されており、必要に応じて重複説明は省略されている。

30

【０２６９】

図６１は、実施の形態１０にかかる量子デバイス５２を示す図である。図６１は、実施の形態１０にかかる量子デバイス５２の平面図である。実施の形態１０にかかる量子デバイス５２は、実施の形態９にかかる量子デバイス５０に対応する構成を、ブリッジレス型の製造方法によって製造したものである。

【０２７０】

実施の形態１０にかかる量子デバイス５２は、複数の第１の導体２１０（２１０Ａ，２１０Ｂ）と、複数の第２の導体２２０（２２０Ａ，２２０Ｂ）と、超伝導回路を構成する導体層２３０（２３０Ａ，２３０Ｂ）とを有する。第１の導体２１０、第２の導体２２０及び導体層２３０は、基板６０に積層されている。第１の導体２１０、第２の導体２２０及び導体層２３０の構成については、特記しない限り、第３の比較例と実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。また、実施の形態１０においても、実施の形態５で導入したＸＹＺ直交座標軸を導入する。

40

【０２７１】

第１の導体２１０は、導体層２３０に積層されている。第２の導体２２０は、第１の導体２１０に積層されている。第１の導体２１０、第２の導体２２０及び導体層２３０は、超伝導材料で形成されている。例えば、第１の導体２１０及び第２の導体２２０は、アルミニウム（Ａｌ）で形成されている。また、例えば、導体層２３０（第３の導体）は、ニオブ（Ｎｂ）で形成されている。

【０２７２】

50

また、第1の導体210と第2の導体220との間には、酸化膜（ AlO_x ）が形成されている。また、第1の導体210（210A）の一部（第1の導体部分210Aa）と、第2の導体220（220B）の一部（第2の導体部分220Ba）と、酸化膜とによって、ジョセフソン接合200が形成されている。ジョセフソン接合200の構成については、第3の比較例及び実施の形態5のものと実質的に同様であるので、適宜、説明を省略する。また、細幅部212A及び細幅部222Bについても、第3の比較例及び実施の形態5のものと実質的に同様であるので、説明を省略する。

【0273】

また、第3の比較例等と同様に、第1の側72Aにおいて、基板60及び導体層230Aに、第1の導体210Aが積層されている。また、第1の導体210A及び導体層230Aに、第2の導体220Aが積層されている。また、第1の導体210Aの、第2の導体220A及び第2の導体220Bと接している面には、酸化膜が形成されている。また、実施の形態5等と同様に、導体層230Aの、第1の導体210A及び第2の導体220Aが積層されている面には、酸化膜が形成されている。

10

【0274】

一方、第3の比較例と同様に、第2の側72Bにおいて、基板60及び導体層230Bに、第1の導体210Bが積層されている。また、基板60及び第1の導体210Bに、第2の導体220Bが積層されている。また、第1の導体210Bの、第2の導体220Bと接している面には、酸化膜（ AlO_x ）が形成されている。また、実施の形態5等と同様に、導体層230Bの、第1の導体210B及び第2の導体220Bが積層されている面には、酸化膜が形成されている。

20

【0275】

また、実施の形態10にかかる量子デバイス52は、接続導体260（260A、260B）を有する。接続導体260は、超伝導材料で形成されている。接続導体260は、例えば、アルミニウム（Al）で形成されてもよい。接続導体260Aは、第1の側72Aにおいて、第1の導体210A及び導体層230Aに、直接、接続されている。これにより、接続導体260Aは、第1の側72Aにおいて、第1の導体210Aと導体層230Aとを接続する（超伝導コンタクト）。なお、実施の形態10では、接続導体260Aは、第1の側72Aにおいて、第2の導体220Aと接続されていてもよい。接続導体260Aは、導体層230A及び第2の導体220Aに積層されている。

30

【0276】

ここで、第1の側72Aにおいて、接続導体260Aと第2の導体220Aと第1の導体210Aとが積層された箇所には、接続穴262Aが形成されている。つまり、接続穴262Aは、第1の側72Aにおける、第1の導体210Aが第2の導体220Aに覆われている箇所に形成されている。そして、接続穴262Aは、第2の導体220A及び第1の導体210Aの酸化膜を貫通し、第1の導体210Aに達している。そして、接続導体260Aが、接続穴262Aの底部まで積層されている。これにより、接続導体260Aが、接続穴262Aにおいて、第1の導体210Aに、直接、接続されている。

【0277】

これにより、第1の導体210Aと、導体層230Aとが、接続穴262Aに形成された接続導体260Aを介して接続される（超伝導コンタクト）。これにより、スプリアス接合82Aの両端の導体（第1の導体210A及び導体層230A）が短絡する。したがって、スプリアス接合82Aは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合82Aに発生する電界は大きくならないので、スプリアス接合82Aはロスの発生に寄与しないこととなる。

40

【0278】

また、接続導体260Bは、第2の側72Bにおいて、第2の導体220B及び導体層230Bに、直接、接続されている。これにより、接続導体260Bは、第2の側72Bにおいて、第2の導体220Bと導体層230Bとを接続する（超伝導コンタクト）。なお、実施の形態10では、接続導体260Bは、第2の側72Bにおいて、第1の導体2

50

10 Bと接続されていてもよい。接続導体260 Bは、導体層230 B、第1の導体210 B及び第2の導体220 Bに積層されている。これにより、第2の導体220 Bが接続導体260 Bと接続される。スプリアス接合82 Bの両端の導体（第2の導体220 B及び導体層230 B）が接続導体260 Bによって短絡するので、スプリアス接合82 Bは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合82 Bに発生する電界は大きくなりないので、スプリアス接合82 Bはロスの発生に寄与しないこととなる。

【0279】

なお、実施の形態10にかかる量子デバイス52の回路構成は、図51に示したものと実質的に同様である。つまり、第1の側72 Aでは、ジョセフソン接合200から導体層230 Aとの間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合82 Aを経由する第1の経路以外にも、第2の経路及び第3の経路が存在する。すなわち、第1の経路は、ジョセフソン接合200が、第1の導体210 Aとスプリアス接合82 Aと第2の導体220 Aと導体層230 Aに形成された酸化膜とを介して、導体層230 Aと接続される経路である。また、第2の経路は、ジョセフソン接合200が第1の導体210 Aと接続され、第1の導体210 Aと導体層230 Aとが、導体層230 Aに形成された酸化膜を介して接続される経路である。一方、第3の経路は、ジョセフソン接合200が第1の導体210 Aと接続され、第1の導体210 Aと導体層230 Aとが、接続穴262 Aに形成された接続導体260 Aを介して接続される経路である。つまり、スプリアス接合82 Aの両端の導体（第1の導体210 A及び導体層230 A）が短絡している。したがって、スプリアス接合82 Aは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合82 Aに発生する電界は大きくなりないので、スプリアス接合82 Aはロスの発生に寄与しないこととなる。

【0280】

また、第2の側70 Bでは、ジョセフソン接合200から導体層230 Bとの間の電氣的な経路として、キャパシタとして機能するスプリアス接合82 Bを経由する第1の経路以外にも、第2の経路が存在する。すなわち、第1の経路は、ジョセフソン接合200が、第2の導体220 Bとスプリアス接合82 Bと第1の導体210 Bと導体層230 Bに形成された酸化膜とを介して、導体層230 Bと接続される経路である。一方、第2の経路は、ジョセフソン接合200が第2の導体220 Bと接続され、第2の導体220 Bと導体層230 Bとが接続導体260 Bを介して接続される経路である。つまり、スプリアス接合82 Bの両端の導体（第2の導体220 B及び導体層230 B）が接続導体260 Bによって短絡しており、スプリアス接合82 Bは電氣的に無効化される。したがって、スプリアス接合82 Bに発生する電界は大きくなりないので、スプリアス接合82 Bはロスの発生に寄与しないこととなる。

【0281】

したがって、実施の形態10では、スプリアス接合82 A、82 Bを無効化することができる。これにより、実施の形態10にかかる量子デバイス52は、性能の劣化を抑制することが可能となる。また、実施の形態10では、実施の形態5等において第1の導体210及び第2の導体220に形成されている突出部が、形成されていなくてもよい。したがって、実施の形態10にかかる量子デバイス52は、突出部を設けなくても、性能の劣化を抑制することが可能となる。つまり、実施の形態10にかかる量子デバイス52は、実施の形態5等と比較して、超伝導体の形状を簡素化することができる。

【0282】

なお、実施の形態10では、接続導体260を成膜する前に、接続穴262 Aを形成する必要がある。したがって、実施の形態10にかかる量子デバイス52は、実施の形態5等と比較して、多くの工程によって製造されることとなる。したがって、実施の形態5等については、実施の形態10と比較して少ない工程で、スプリアス接合82を無効化した量子デバイス52を製造することができる。

【0283】

（変形例）

なお、本発明は上記実施の形態に限られたものではなく、趣旨を逸脱しない範囲で適宜変更することが可能である。例えば、複数の実施の形態のそれぞれは、互いに適用可能である。例えば、実施の形態 1 に実施の形態 9 を適用してもよい。これにより、接続導体と第 1 の導体 110A との接続面積を大きくすることができる。また、上述した実施の形態 1 では、第 1 の導体 110 が導体層 130 に積層されているが、このような構成に限られない。第 1 の導体 110 が導体層 130 に積層されていなくても、接続導体 150 によって、第 1 の導体 110 と導体層 130 とを接続するようにしてもよい。他の実施の形態についても同様である。

【0284】

以上、実施の形態を参照して本願発明を説明したが、本願発明は上記によって限定されるものではない。本願発明の構成や詳細には、発明のスコープ内で当業者が理解し得る様々な変更をすることができる。

【0285】

上記の実施形態の一部又は全部は、以下の付記のようにも記載されうるが、以下には限られない。

(付記 1)

超伝導材料で層状に形成された複数の第 1 の導体と、
少なくとも一部が前記第 1 の導体に積層され、超伝導材料で形成された複数の第 2 の導体と、

超伝導材料で形成された導体層と、

を有し、

前記第 1 の導体と前記第 2 の導体との間に酸化膜が形成され、複数の前記第 1 の導体のうちの 1 つの前記第 1 の導体の一部と複数の前記第 2 の導体のうちの 1 つの前記第 2 の導体の一部と前記酸化膜とによってジョセフソン接合が形成され、

前記第 1 の導体には前記第 2 の導体に覆われていない少なくとも 1 つの第 1 の突出部が形成されており、

前記第 1 の突出部と前記導体層とが、直接又は導体を介して接続されており、

前記第 2 の導体と前記導体層とが、直接又は導体を介して接続されている、

量子デバイス。

(付記 2)

超伝導材料で形成された少なくとも 1 つの接続導体、

をさらに有し、

前記接続導体によって、前記第 1 の突出部と前記導体層とが接続されている、

付記 1 に記載の量子デバイス。

(付記 3)

前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第 1 の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第 1 の側で、少なくとも前記第 1 の突出部と前記導体層とが前記接続導体によって接続され、

前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第 2 の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第 2 の側で、少なくとも前記第 2 の導体と前記導体層とが前記接続導体によって接続されている、

付記 2 に記載の量子デバイス。

(付記 4)

前記第 1 の側において、前記ジョセフソン接合を構成する前記第 1 の導体に少なくとも 1 つの前記第 1 の突出部が形成され、前記接続導体によって当該第 1 の突出部が前記導体層と接続されており、

前記第 2 の側において、前記ジョセフソン接合を構成する前記第 2 の導体には前記第 1 の導体よりも突出した少なくとも 1 つの第 2 の突出部が形成され、前記接続導体によって前記第 2 の突出部が前記導体層と接続されている、

付記 3 に記載の量子デバイス。

10

20

30

40

50

(付記 5)

前記第 1 の側において複数の前記第 1 の突出部が形成され、複数の前記第 1 の突出部が、前記接続導体によって前記導体層と接続されており、
前記第 2 の側において複数の前記第 2 の突出部が形成され、複数の前記第 2 の突出部が、前記接続導体によって前記導体層と接続されている、
付記 4 に記載の量子デバイス。

(付記 6)

前記第 1 の側において、前記ジョセフソン接合を構成しない前記第 2 の導体は前記導体層と前記接続導体を介して接続されておらず、
前記第 2 の側において、前記ジョセフソン接合を構成しない前記第 1 の導体は前記導体層と前記接続導体を介して接続されていない、
付記 4 又は 5 に記載の量子デバイス。

(付記 7)

前記第 1 の導体に形成された前記第 1 の突出部の近傍で、前記第 2 の導体と前記導体層とが前記接続導体によって接続されている、
付記 2 に記載の量子デバイス。

(付記 8)

複数の前記第 1 の突出部の近傍において、前記第 2 の導体には、前記第 1 の突出部と互いに同じ側に突出した複数の第 2 の突出部が形成され、前記接続導体によって、第 1 の突出部及び前記第 2 の突出部が前記導体層と接続されている、
付記 7 に記載の量子デバイス。

(付記 9)

超伝導材料で形成された導体層が形成された基板に、超伝導材料で形成され第 1 の突出部を有する第 1 の導体と超伝導材料で形成された第 2 の導体とによってジョセフソン接合を形成するためのレジストマスクを形成し、
前記レジストマスクが形成された基板に、第 1 の方向からの斜め蒸着によって、複数の前記第 1 の導体を積層し、
前記第 1 の導体の表面を酸化して酸化膜を形成し、
複数の前記第 1 の導体それぞれに、第 2 の方向からの斜め蒸着によって、前記第 2 の導体の少なくとも一部を積層し、これによって、複数の前記第 1 の導体のうちの 1 つの前記第 1 の導体の一部と複数の前記第 2 の導体のうちの 1 つの前記第 2 の導体の一部と前記酸化膜とによって前記ジョセフソン接合を形成し、
前記第 2 の導体に覆われていない前記第 1 の突出部と前記導体層とを、直接又は導体を介して接続し、
前記第 2 の導体と前記導体層とを、直接又は導体を介して接続する、
量子デバイスの製造方法。

(付記 10)

前記第 1 の突出部と前記導体層とに、超伝導材料で形成された接続導体を積層することによって、前記第 1 の突出部と前記導体層とを接続する、
付記 9 に記載の量子デバイスの製造方法。

(付記 11)

前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第 1 の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第 1 の側で、少なくとも前記第 1 の突出部と前記導体層とを前記接続導体によって接続し、
前記ジョセフソン接合に対して前記ジョセフソン接合を構成する前記第 2 の導体が前記導体層の方に延びるように形成された側である第 2 の側で、少なくとも前記第 2 の導体と前記導体層とを前記接続導体によって接続する、
付記 10 に記載の量子デバイスの製造方法。

(付記 12)

前記導体層に前記第 1 の導体を積層する際に、前記第 1 の側において、少なくとも 1 つ

10

20

30

40

50

の前記第 1 の突出部を形成し、

前記第 1 の導体に前記第 2 の導体を積層する際に、

前記第 1 の導体の一部と前記第 2 の導体の一部とが重なるように前記第 2 の導体の斜め蒸着を行うことによって、前記ジョセフソン接合を形成し、

前記第 2 の側において、前記第 2 の導体に前記第 1 の導体よりも突出した少なくとも 1 つの第 2 の突出部を形成し、

前記接続導体によって前記第 1 の突出部と前記導体層とを接続し、前記接続導体によって前記第 2 の突出部と前記導体層とを接続する、

付記 1 1 に記載の量子デバイスの製造方法。

(付記 1 3)

前記第 1 の導体を積層する際に、前記第 1 の側に複数の前記第 1 の突出部を形成し、

前記第 2 の導体を積層する際に、前記第 2 の側に複数の前記第 2 の突出部を形成し、

前記接続導体によって、複数の前記第 1 の突出部を前記導体層と接続し、

前記接続導体によって、複数の前記第 2 の突出部を前記導体層と接続する、

付記 1 2 に記載の量子デバイスの製造方法。

(付記 1 4)

前記第 1 の側において、前記ジョセフソン接合を構成しない前記第 2 の導体が前記導体層と前記接続導体を介して接続されないように、前記接続導体によって前記第 1 の突出部と前記導体層とを接続し、

前記第 2 の側において、前記ジョセフソン接合を構成しない前記第 1 の導体が前記導体層と直接又は導体を介して接続されないように、前記接続導体によって前記第 2 の突出部と前記導体層とを接続する、

付記 1 2 又は 1 3 に記載の量子デバイスの製造方法。

(付記 1 5)

前記第 1 の導体に形成された前記第 1 の突出部の近傍で、前記第 2 の導体と前記導体層とを前記接続導体によって接続する、

付記 1 0 に記載の量子デバイスの製造方法。

(付記 1 6)

前記第 2 の導体を積層する際に、複数の前記第 1 の突出部の近傍において、前記第 2 の導体に、前記第 1 の突出部と互いに同じ側に突出した複数の第 2 の突出部を形成し、

前記接続導体によって、第 1 の突出部及び前記第 2 の突出部を前記導体層と接続する、

付記 1 5 に記載の量子デバイスの製造方法。

【符号の説明】

【0 2 8 6】

1 量子デバイス

2 第 1 の導体

2 a 突出部

4 第 2 の導体

6 導体層

8 酸化膜

1 0 ジョセフソン接合

5 0 , 5 2 量子デバイス

6 0 基板

7 0 A , 7 2 A 第 1 の側

7 0 B , 7 2 B 第 2 の側

8 0 , 8 2 スプリアス接合

1 0 0 ジョセフソン接合

1 0 2 トンネルバリア層

1 1 0 第 1 の導体

1 1 0 A a 第 1 の導体部分

10

20

30

40

50

1 1 0 B	第 1 の導体	
1 1 2 A	突出部	
1 1 4	突出部	
1 1 6 A	突出部	
1 2 0	第 2 の導体	
1 2 0 B a	第 2 の導体部分	
1 2 0 X	超伝導材料	
1 2 4	突出部	
1 2 6 A	突出部	
1 3 0	導体層	10
1 3 2	酸化膜	
1 4 0	酸化膜	
1 4 2	酸化膜	
1 5 0	接続導体	
1 5 2	接続導体	
1 5 4	接続導体	
1 5 6 A	接続導体	
1 5 8 B	接続導体	
1 6 0	接続導体	
1 6 2 A	接続穴	20
2 0 0	ジョセフソン接合	
2 1 0	第 1 の導体	
2 1 0 A a	第 1 の導体部分	
2 1 2 A	細幅部	
2 1 4 A	突出部	
2 1 4 B	突出部	
2 1 6 A	突出部	
2 2 0	第 2 の導体	
2 2 0 B a	第 2 の導体部分	
2 2 2 B	細幅部	30
2 2 4 A	突出部	
2 2 4 B	突出部	
2 2 6 B	突出部	
2 3 0	導体層	
2 5 0	接続導体	
2 5 6	接続導体	
2 5 8 B	接続導体	
2 6 0	接続導体	
2 6 2 A	接続穴	
3 0 0	レジストマスク	40
3 0 0 b	レジストブリッジ	
3 0 2	開口部	
3 0 4	細穴部	
3 1 0	レジストマスク	
3 1 2	開口部	
3 1 4 A	凹部	
3 1 4 B	凹部	
3 2 0	レジストマスク	
3 2 1	レジストマスク部分	
3 2 2	開口部	50

4 0 0 レジストマスク
4 0 2 開口部
4 1 0 レジストマスク
4 1 2 B 開口部
4 2 0 レジストマスク
4 2 2 A 開口部
4 3 0 レジストマスク
4 3 2 開口部
5 0 0 レジストマスク
5 0 2 開口部
5 0 4 A 細穴部
5 0 4 B 細穴部
5 0 6 A 凹部
5 0 6 B 凹部
5 1 0 レジストマスク
5 1 2 開口部
5 1 6 A 凹部
5 1 6 B 凹部

【図面】

【図 1】

【図 2】

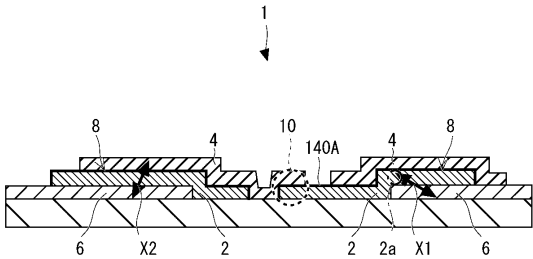


Fig. 1

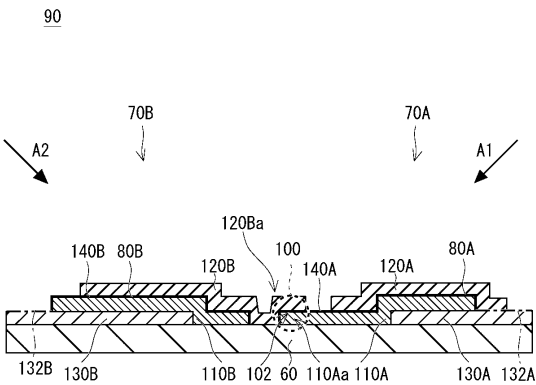


Fig. 2

【図 3】

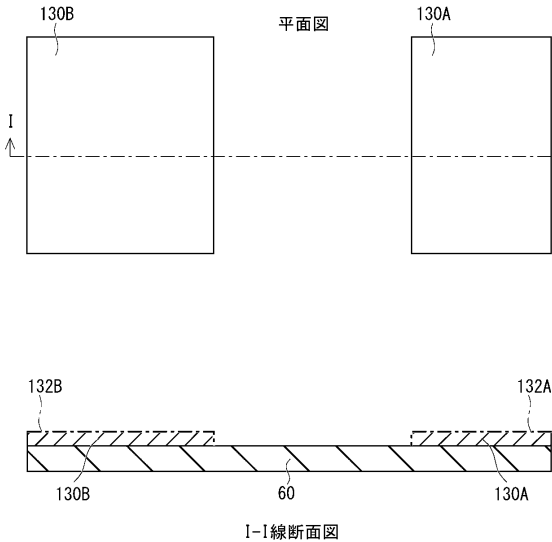


Fig. 3

【図 4】

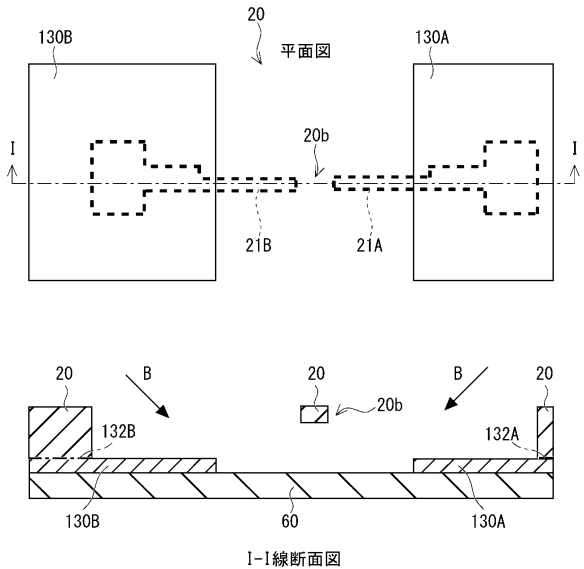


Fig. 4

【図 5】

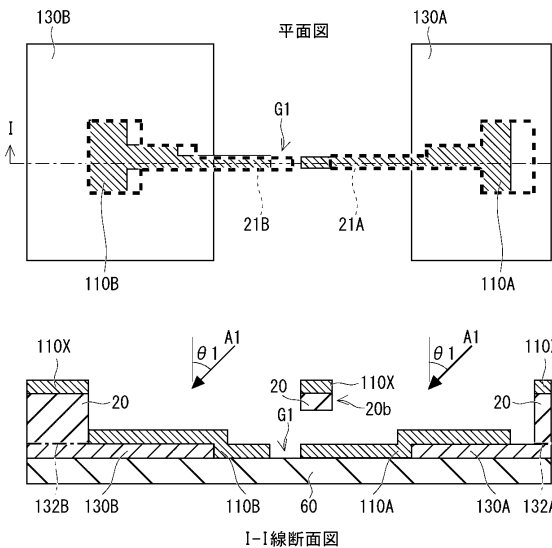


Fig. 5

【図 6】

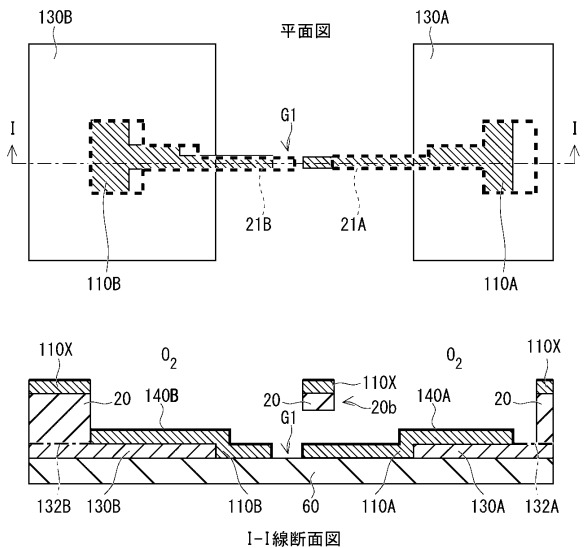


Fig. 6

10

20

30

40

50

【図 7】

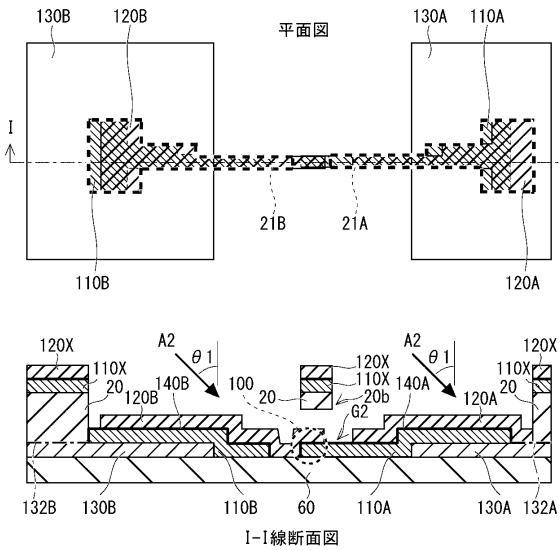


Fig. 7

【図 8】

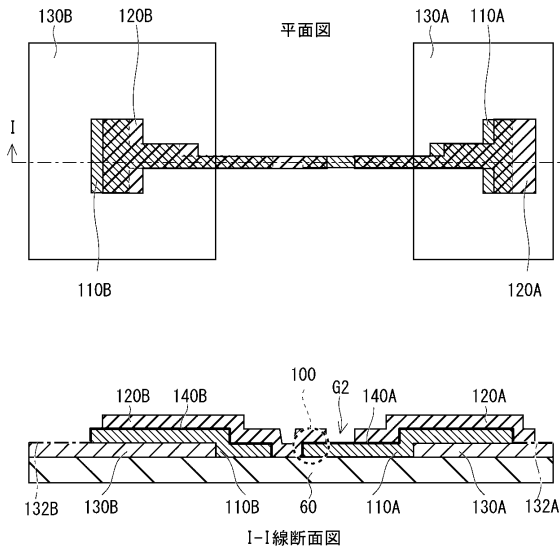


Fig. 8

【図 9】

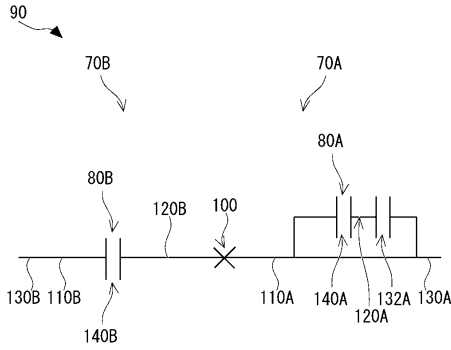


Fig. 9

【図 10】

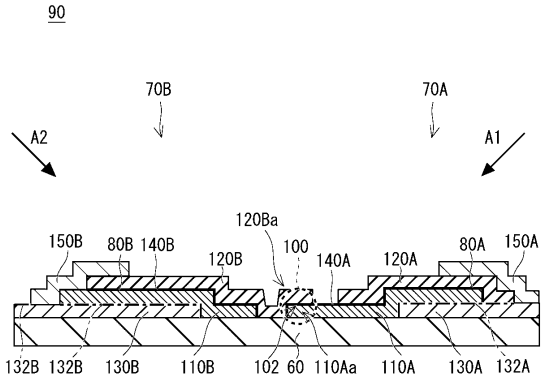


Fig. 10

10

20

30

40

50

【図 1 1】

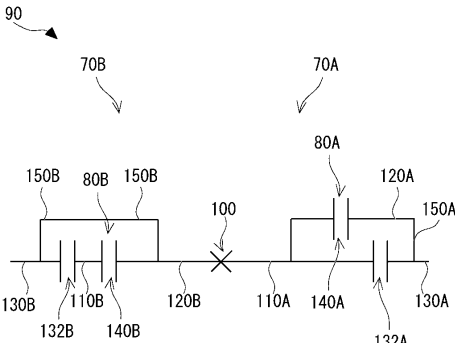


Fig. 11

【図 1 2】

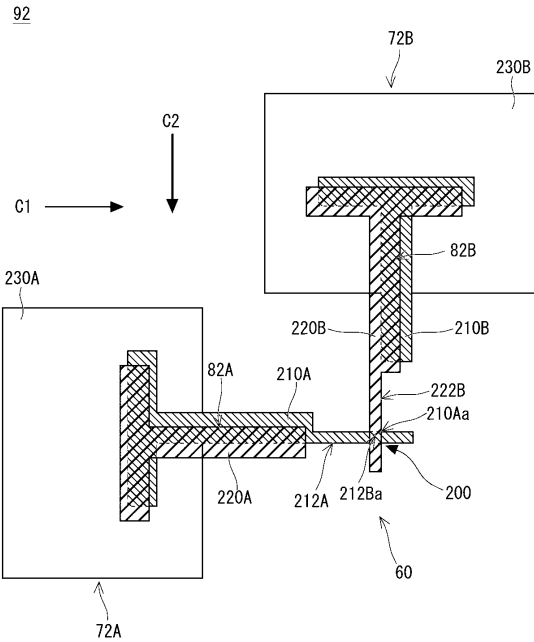


Fig. 12

【図 1 3】

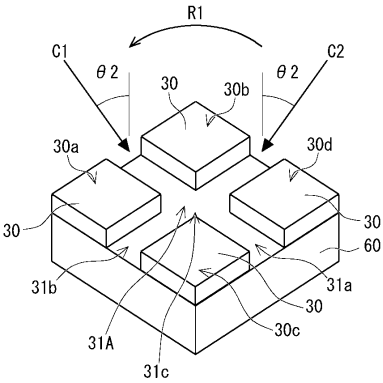


Fig. 13

【図 1 4】

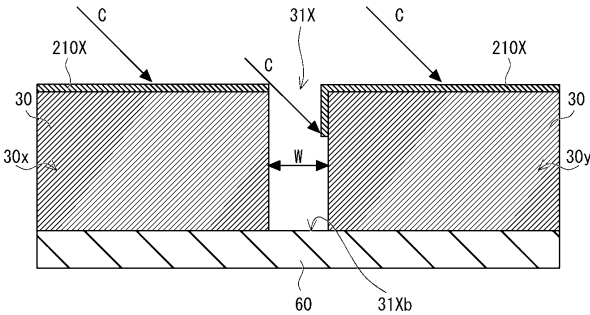


Fig. 14

10

20

30

40

50

【図 15】

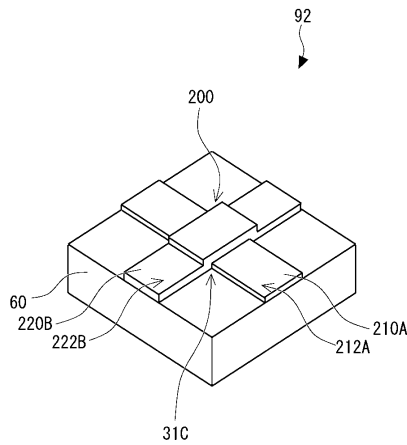


Fig. 15

【図 16】

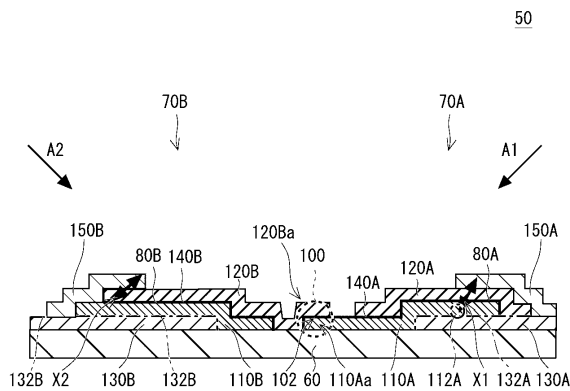


Fig. 16

【図 17】

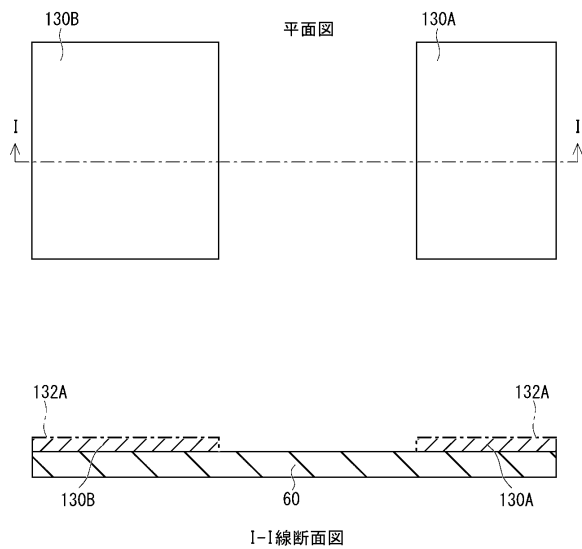


Fig. 17

【図 18】

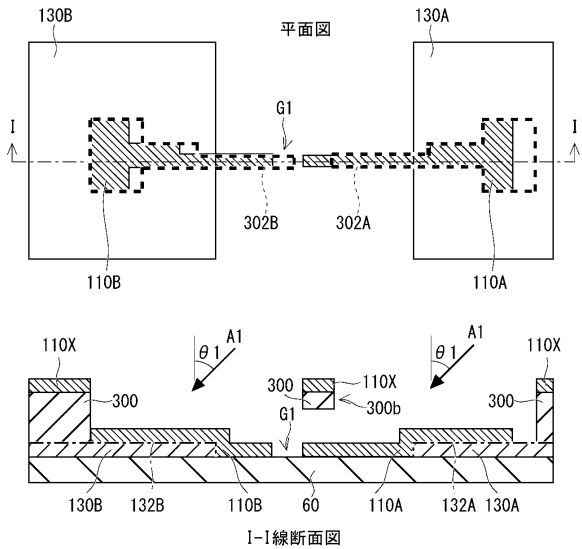


Fig. 18

10

20

30

40

50

【図 19】

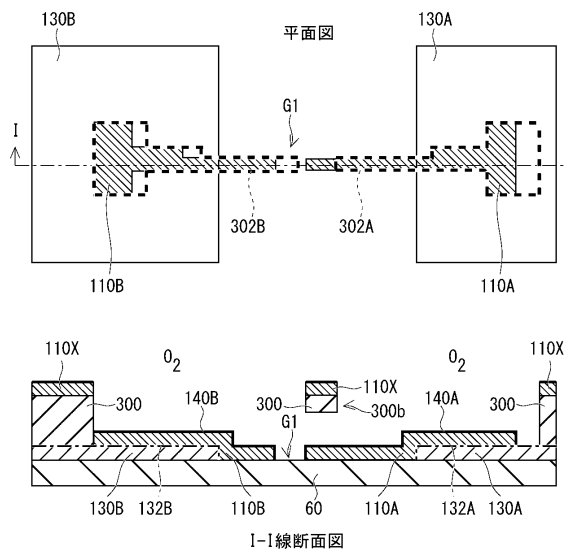


Fig. 19

【図 20】

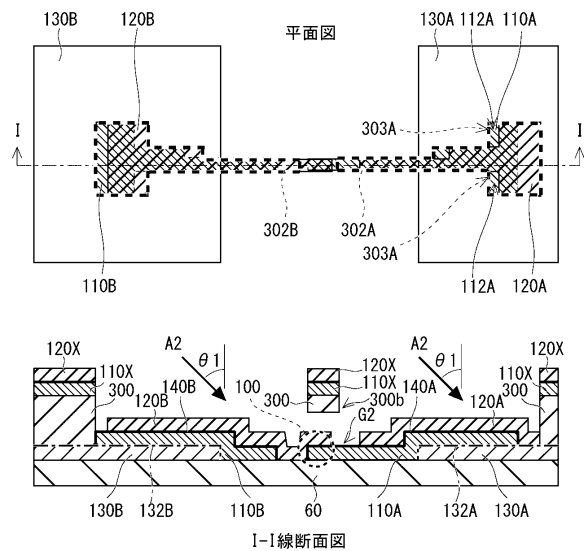


Fig. 20

【図 21】

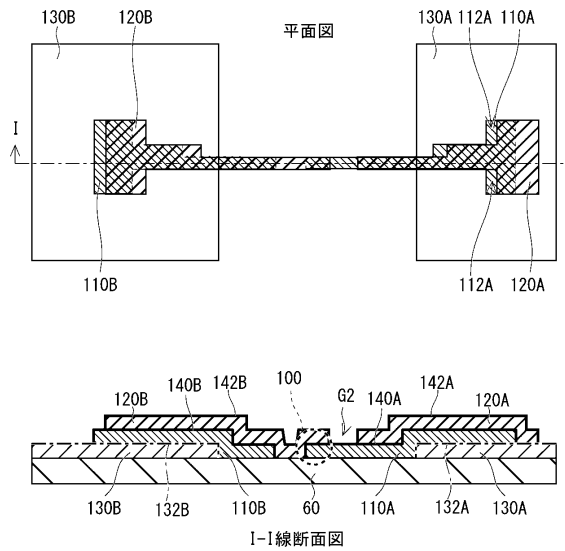


Fig. 21

【図 22】

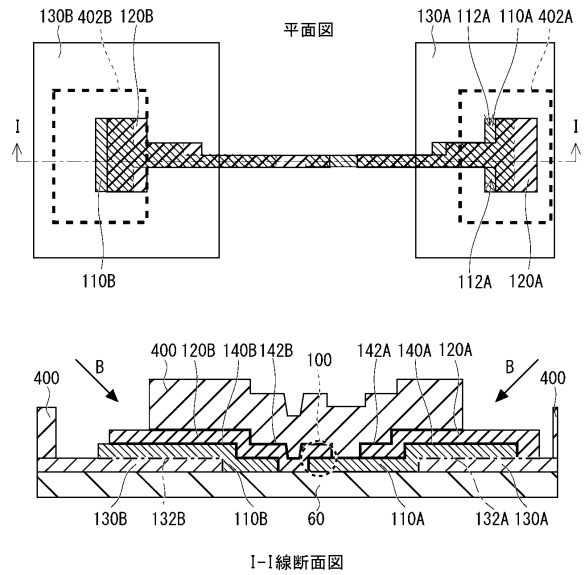


Fig. 22

10

20

30

40

50

【図 2 3】

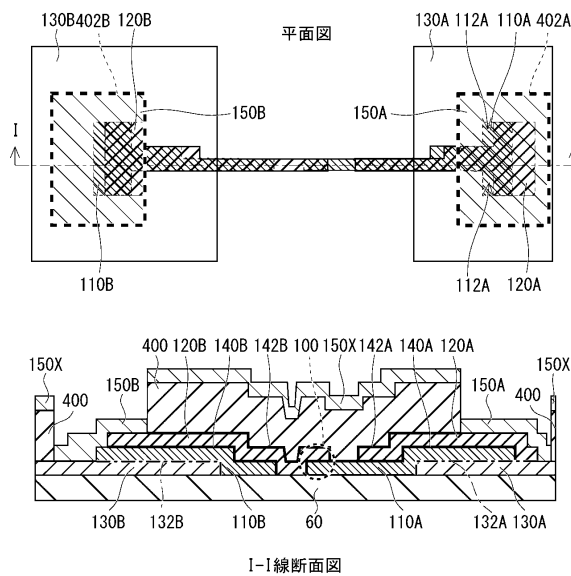


Fig. 23

【図 2 4】

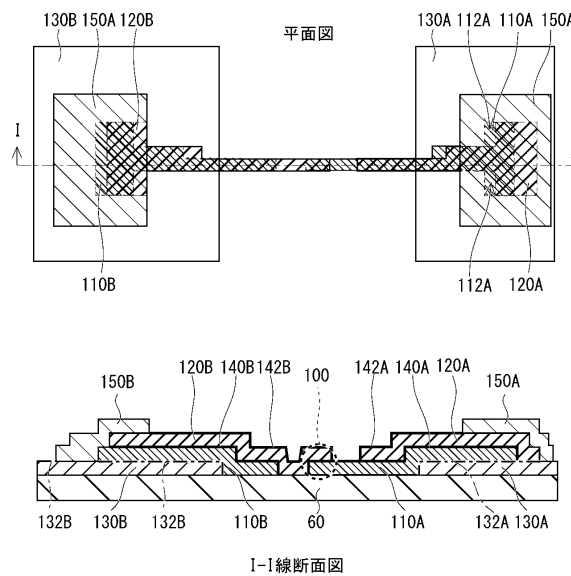


Fig. 24

【図 2 5】

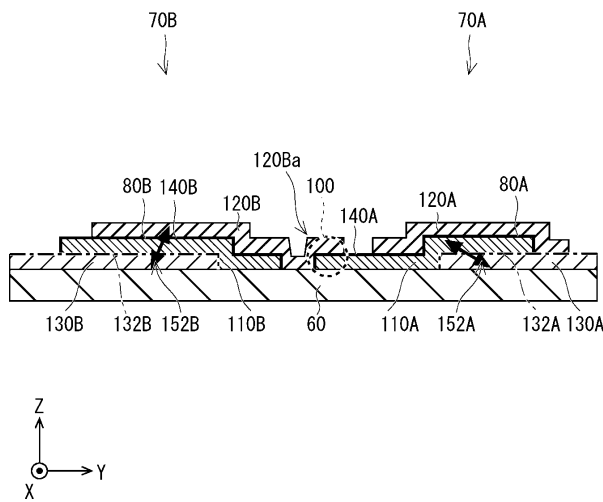


Fig. 25

【図 2 6】

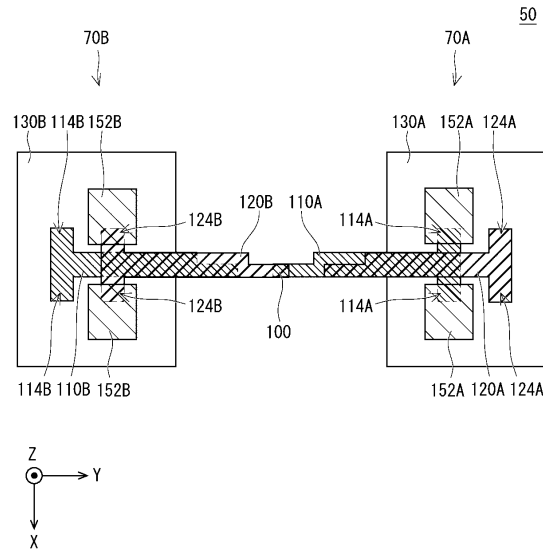


Fig. 26

10

20

30

40

50

【図 2 7】

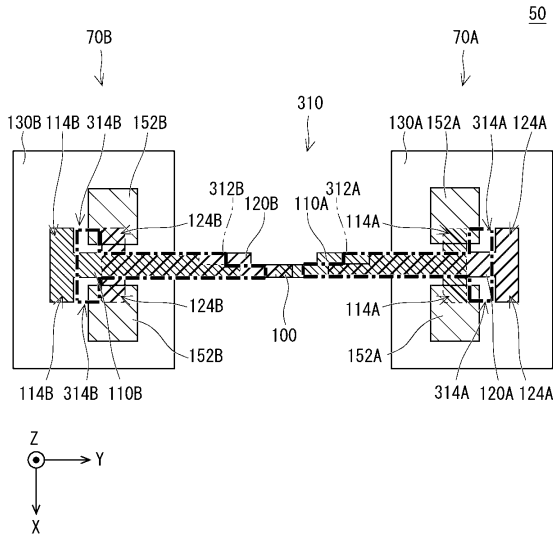


Fig. 27

【図 2 8】

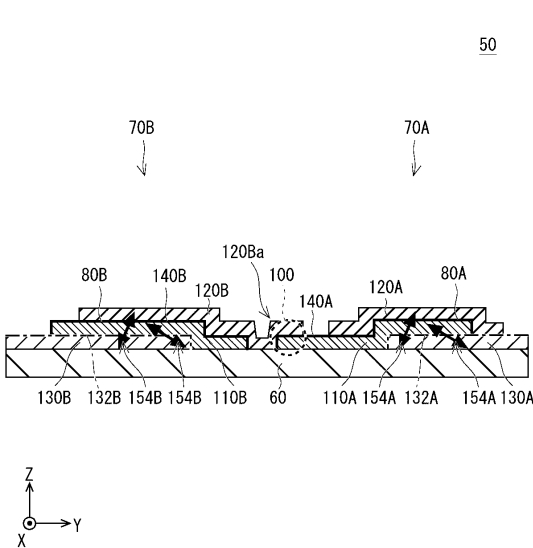


Fig. 28

【図 2 9】

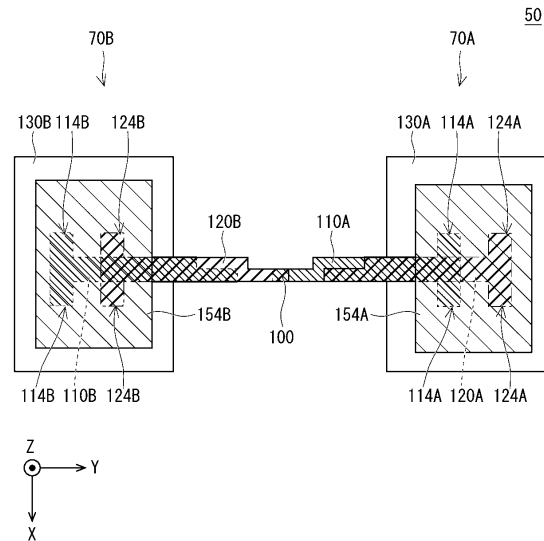


Fig. 29

【図 3 0】

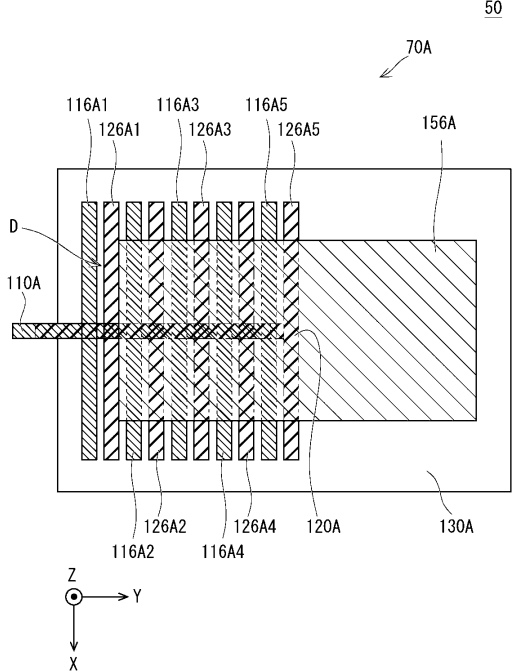


Fig. 30

【図 3 1】

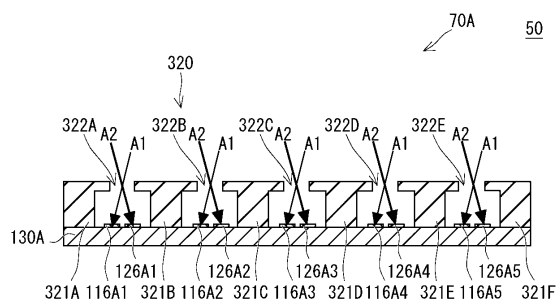


Fig. 31

【図 3 2】

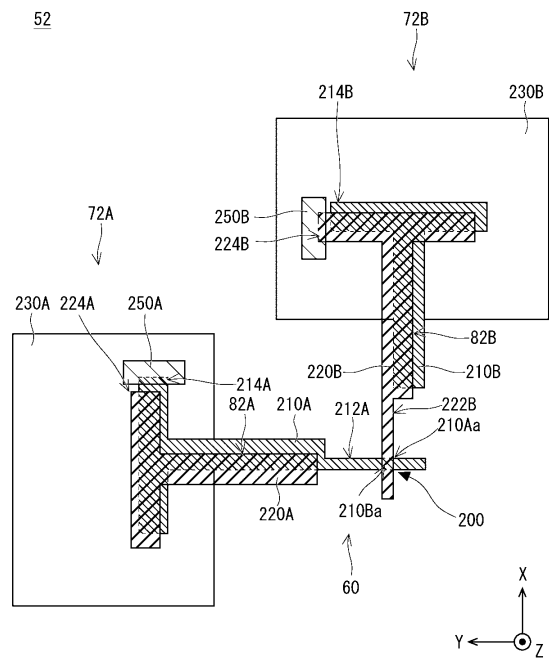


Fig. 32

【図 3 3】

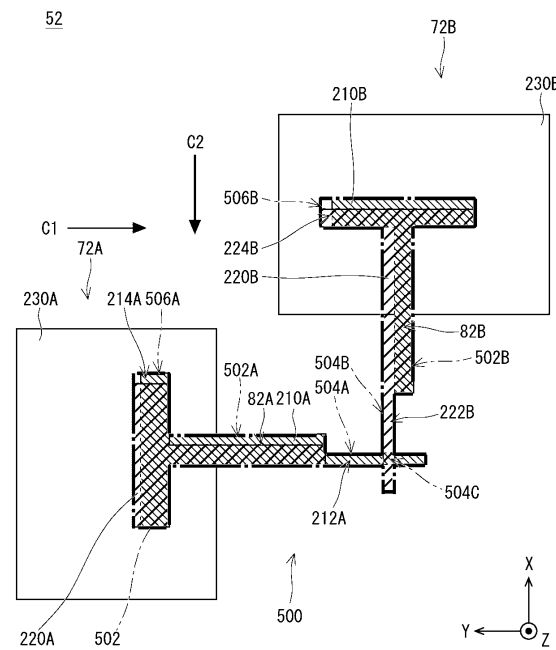


Fig. 33

【図 3 4】

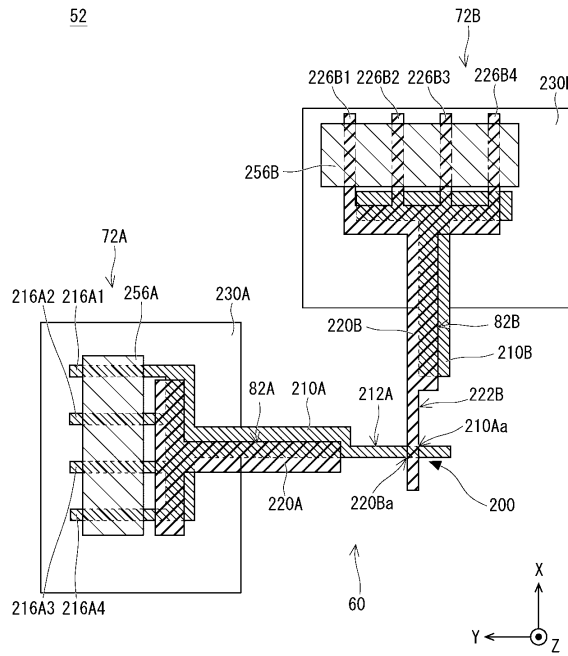


Fig. 34

10

20

30

40

50

【圖 3 5】

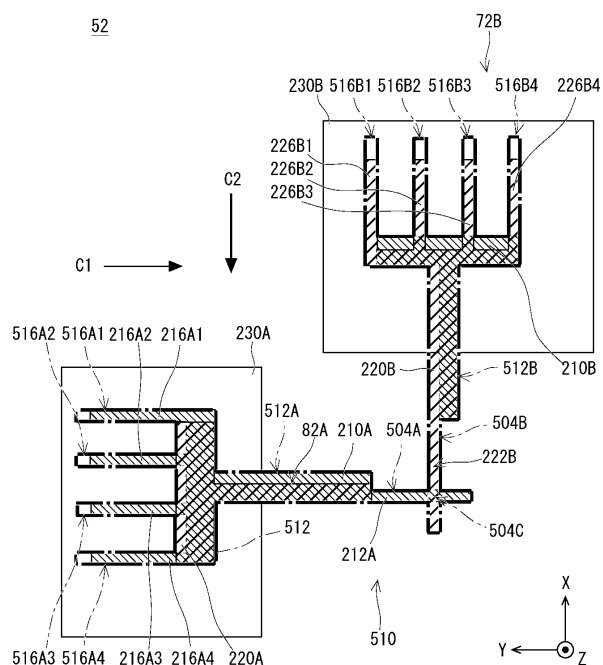


Fig. 35

【図 3 6】

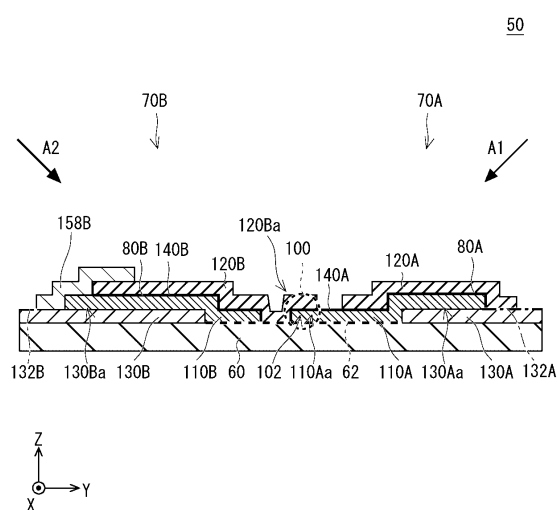


Fig. 36

【図 3 7】

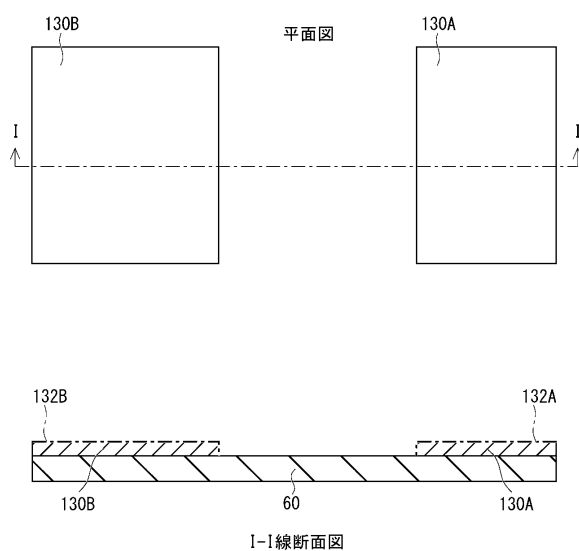


Fig. 37

【圖 3 8】

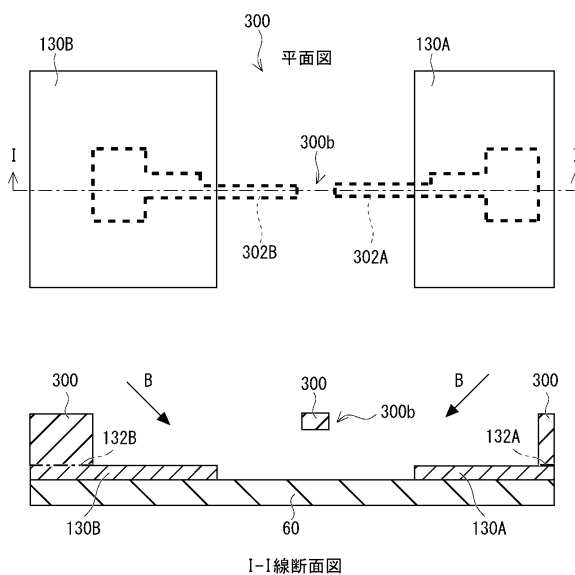


Fig. 38

【図 3 9】

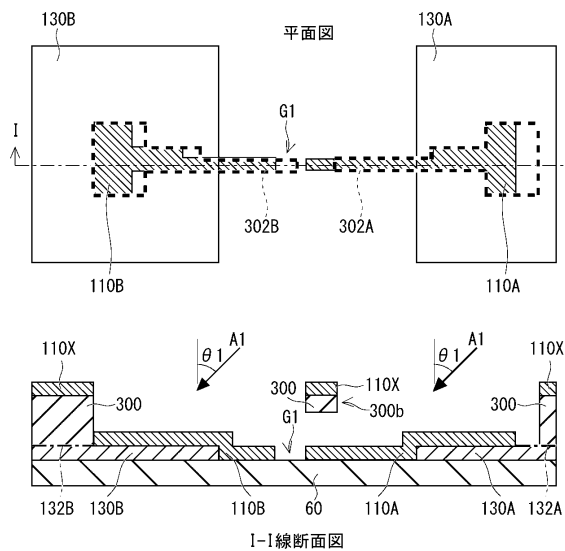


Fig. 39

【図 4 0】

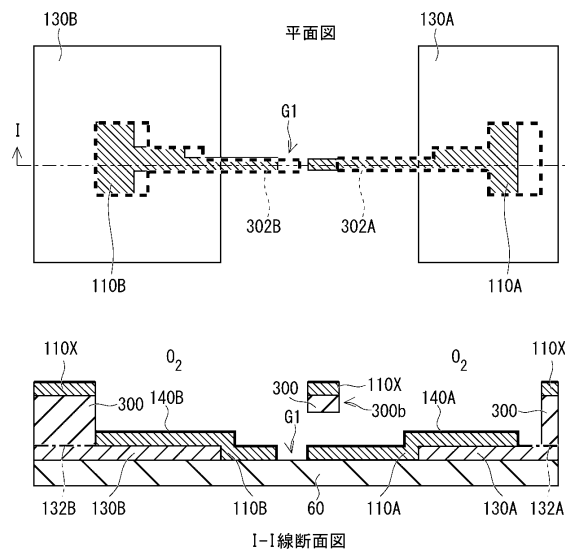


Fig. 40

【図 4 1】

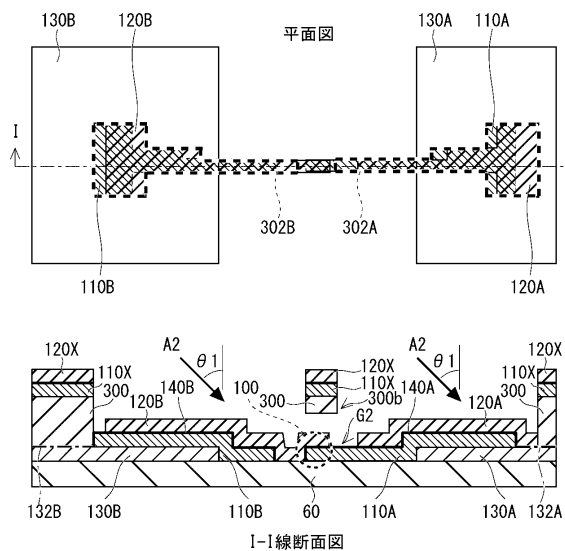


Fig. 41

【図 4 2】

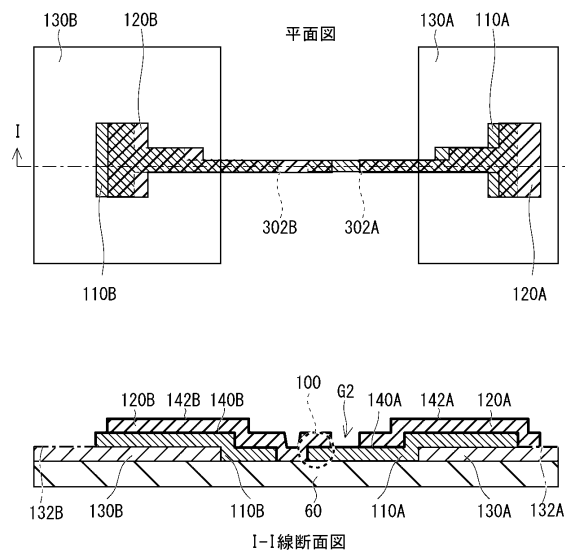


Fig. 42

10

20

30

40

50

【図 4 3】

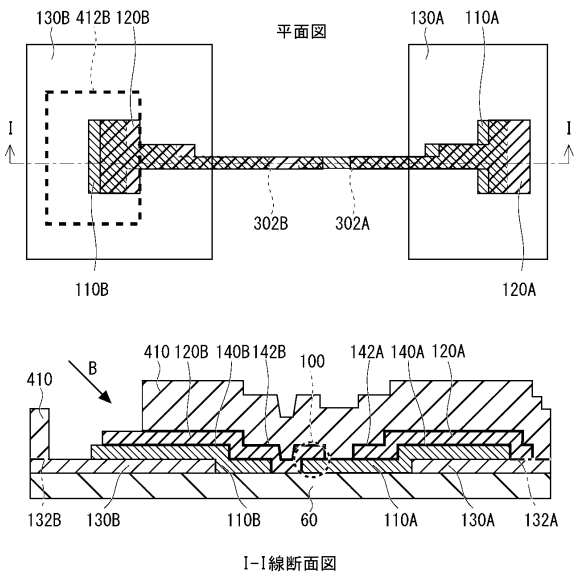


Fig. 43

【図 4 4】

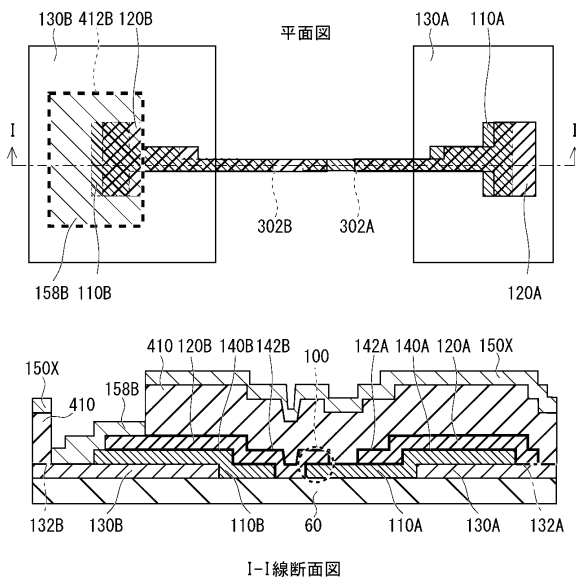


Fig. 44

【図 4 5】

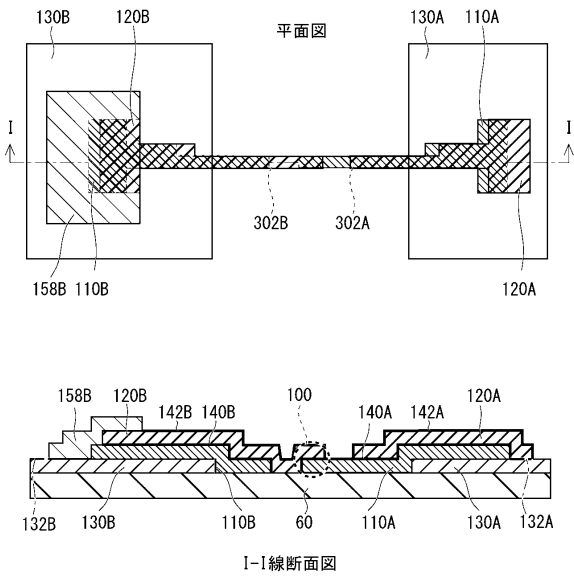


Fig. 45

【図 4 6】

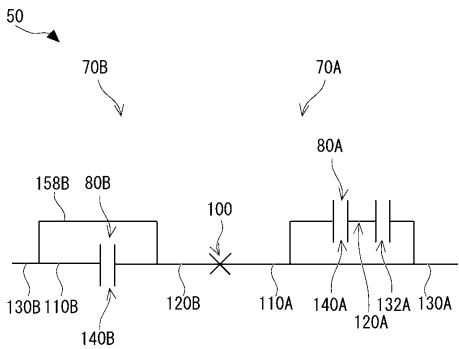


Fig. 46

10

20

30

40

50

【図 4 7】

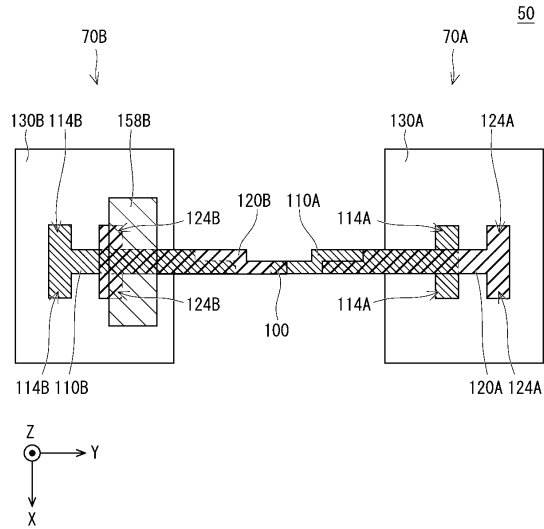


Fig. 47

【図 4 8】

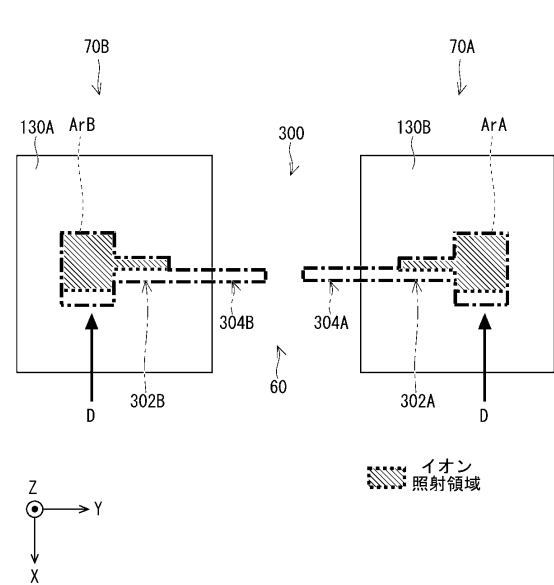


Fig. 48

【図 4 9】

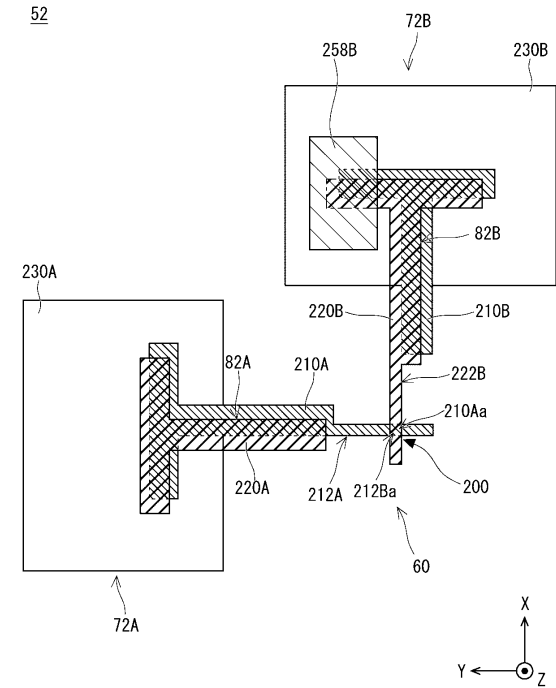


Fig. 49

【図 5 0】

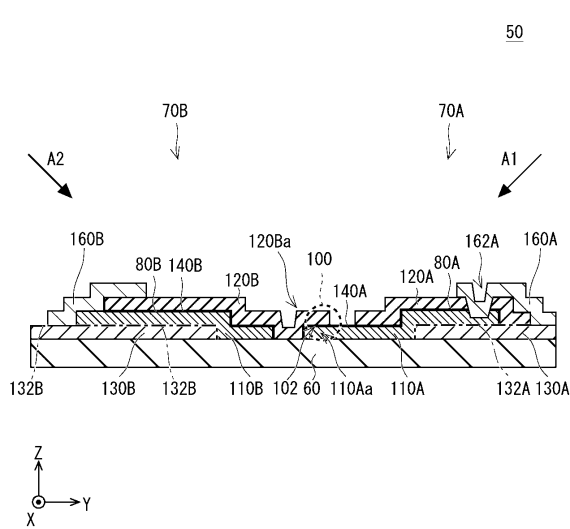


Fig. 50

10

20

30

40

50

【図 5 1】

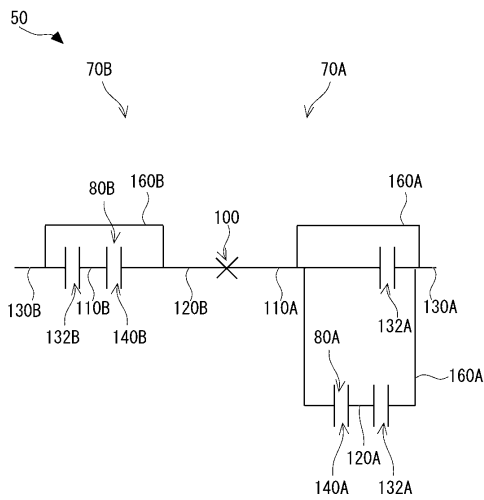


Fig. 51

【図 5 2】

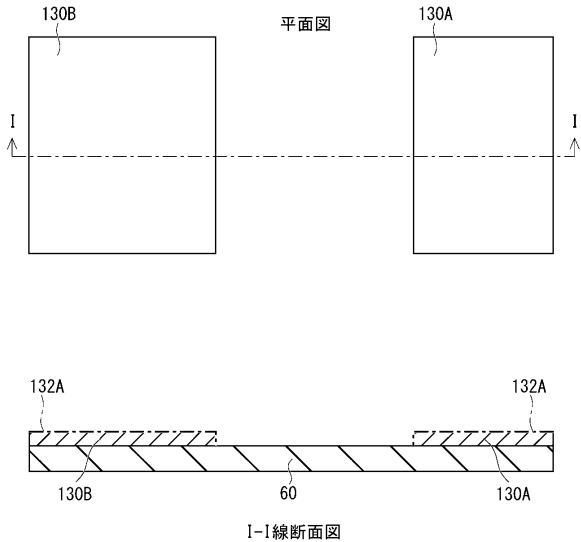


Fig. 52

【図 5 3】

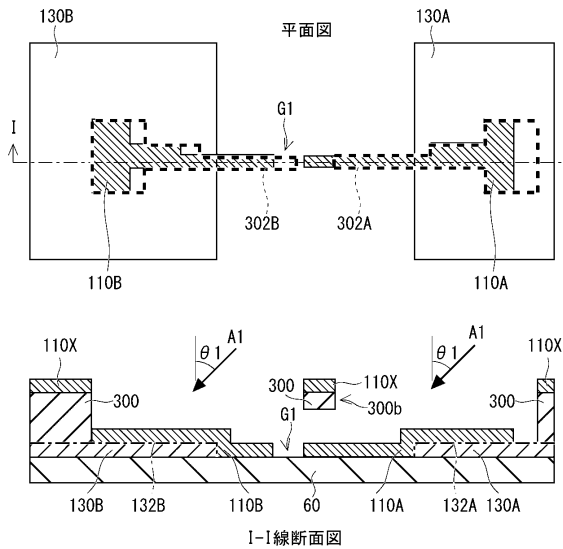


Fig. 53

【図 5 4】

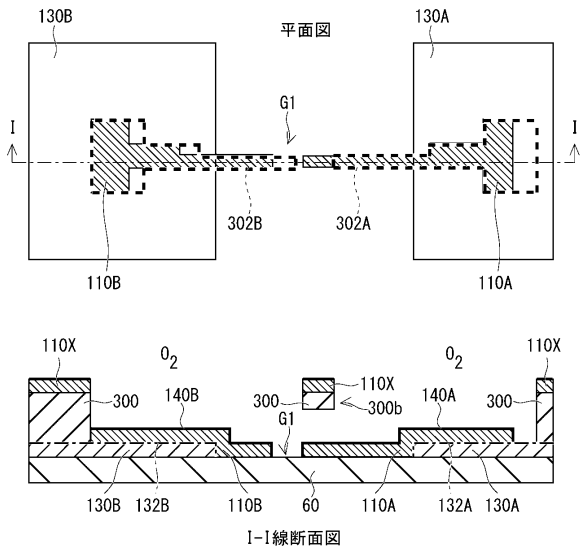


Fig. 54

10

20

30

40

50

【図 5 5】

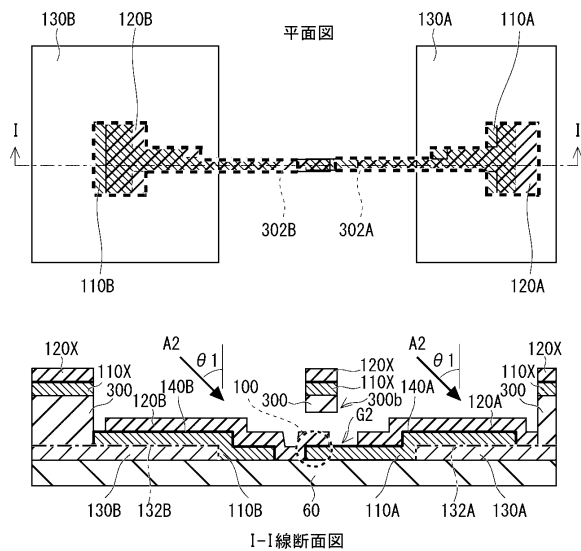


Fig. 55

【図 5 6】

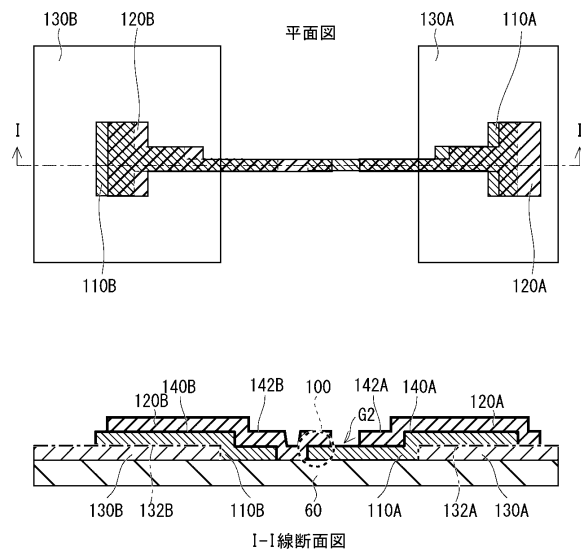


Fig. 56

【図 5 7】

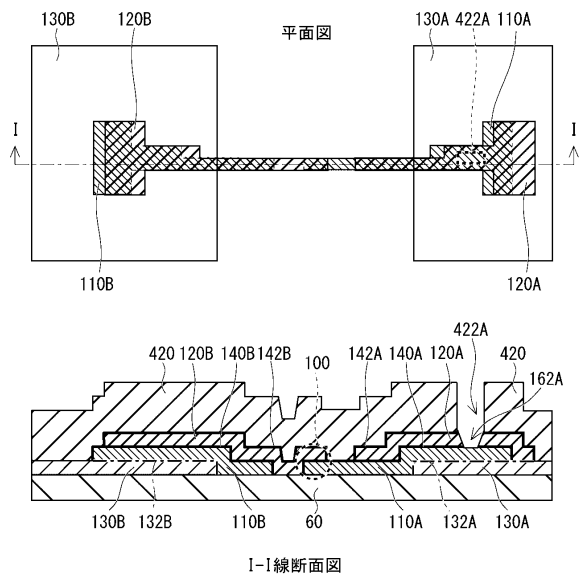


Fig. 57

【図 5 8】

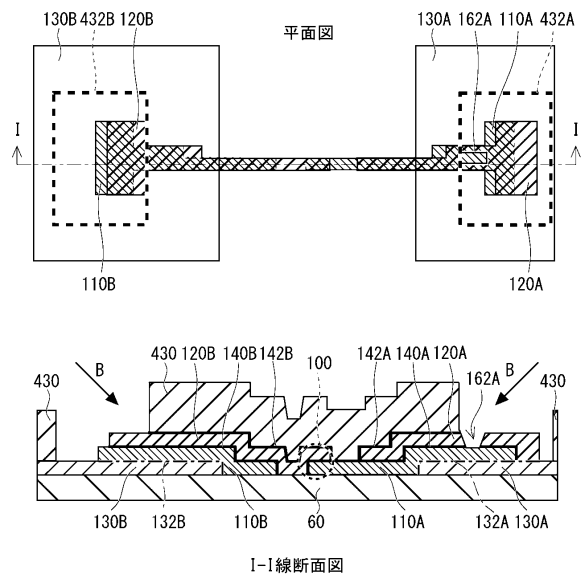


Fig. 58

10

20

30

40

50

【図 5 9】

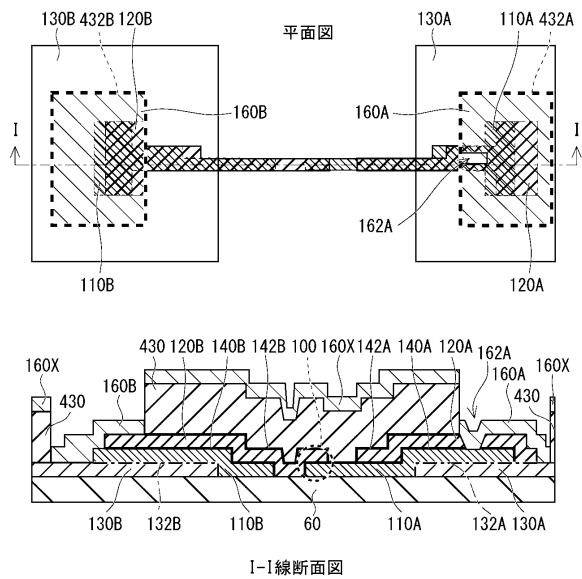


Fig. 59

【図 6 0】

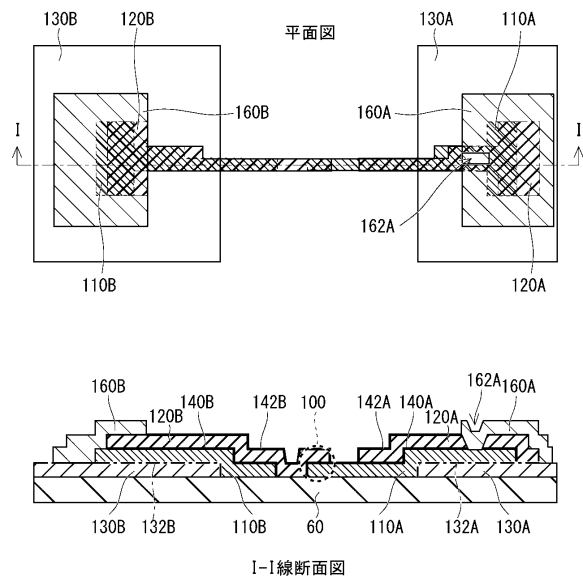


Fig. 60

【図 6 1】

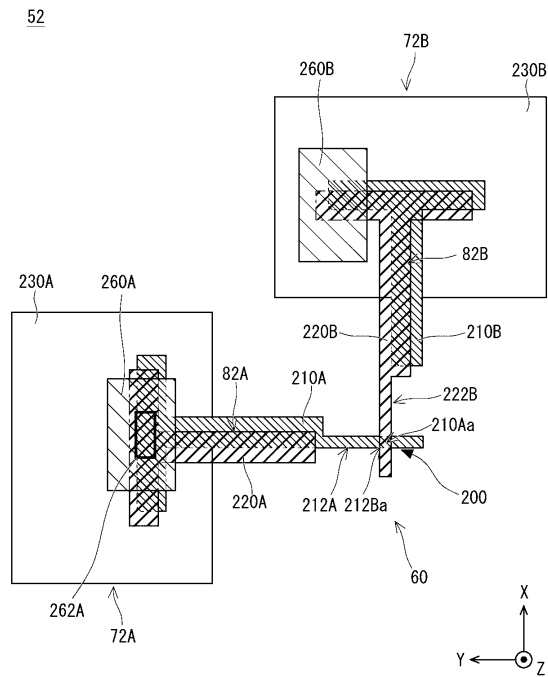


Fig. 61

10

20

30

40

50

フロントページの続き

- (56)参考文献 国際公開第2019/032115 (WO, A1)
 特開平04-268758 (JP, A)
 特開昭64-074777 (JP, A)
 特開昭59-135783 (JP, A)
 国際公開第2017/015432 (WO, A1)
 米国特許出願公開第2019/0363239 (US, A1)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
 H10N 60/12